



uc3m | **Universidad Carlos III** de Madrid

Grado en Ingeniería mecánica

Curso 2018-2019

Trabajo de fin de grado

Estudio de la separación de tubos en el receptor de una central termosolar de tipo torre

Carlos Miguel Martín

Tutor: Rafael Pérez Álvarez

Leganés, 2019





GRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA

TRABAJO DE FIN DE GRADO

Estudio de la separación de tubos en el receptor de una central termosolar de tipo torre

Autor: Carlos Miguel Martín

Tutor: Rafael Pérez Álvarez

EL TRIBUNAL

Presidente:

Secretario:

Vocal:



Resumen

Actualmente se está produciendo un desarrollo de las energías renovables motivado por la escasez existente de combustibles fósiles y de los problemas medioambientales que estos producen, siendo una las energías más prometedoras la energía solar térmica de tipo torre.

En este proyecto se va a abordar el principal problema que se produce en el receptor de estas centrales, ya que se producen grandes gradientes de temperaturas en la superficie de los tubos que forman el receptor debido a que la radiación solar concentrada proveniente del campo de heliostatos incide únicamente en uno de los lados. Esta diferencia de temperaturas provoca un estrés térmico que, sumado a la corrosión causada por el fluido de trabajo que circula por el interior de los tubos, hace que estos se rompan.

Para tratar de reducir las tensiones a las que se someten los tubos del receptor, se buscará una geometría óptima en la que se reduzcan las diferencias de temperatura entre la parte delantera y trasera del tubo. Para ello, mediante el uso del software ANSYS v19.2, se han creado mediante Workbench una serie de geometrías variando la separación lateral existente entre los tubos de la central, además de variar la distancia entre los tubos y la pared rerradiante situada tras estos. Tras esto, se han realizado mediante Fluent simulaciones CFD para caracterizar el campo de temperaturas a las que está sometido el tubo ante diferentes condiciones de trabajo, tales como el uso de distintos materiales para la superficie del tubo o la variación de la temperatura del fluido de trabajo que circula por su interior. Por último, los datos que se obtienen a partir de estas simulaciones se exportarán a MATLAB, donde se post-procesarán obteniendo de esta manera los diferentes resultados.

A partir de estas simulaciones se ha concluido que la separación lateral entre los tubos tiene un mayor impacto que la distancia entre el tubo y la pared trasera del receptor, llegando a la conclusión de que los gradientes de temperaturas producidos en la superficie de los tubos se reducen cuanto más aumenta la separación existente entre los distintos tubos.

Palabras clave: Receptor solar, energía solar, torre, temperatura, tubo, simulación numérica CFD

Abstract

Nowadays it has been producing an increase of the use of renewable energies due to the scarcity of fossil fuel and the environmental problems they produce. The solar power tower technology has one of the brightest futures in terms of renewable energies.

In this project we will address the main issue that produces in the receiver of this power plants, since a huge gradient of temperatures is produced on the surface of the tubes that composes the receiver due to the concentrated solar radiation that comes from the heliostat field points to only one of the sides of the tube. The different temperatures in the tube's surface produce thermal stress. In addition to this, the work fluid which flows inside the tube creates corrosion problems, making the tubes break.

For reducing the stress of the tubes, we will reach an optimal geometry where the differences of temperature in the different sides of the tube will decrease. For that purpose, using the software ANSYS v19.2, several geometries have been created by Workbench modifying the separation between the tubes of the receiver and the separation between the tubes and the wall. Then, using Fluent, CFD simulations have been made for define the temperature's gradient in the surface of the tube in different work conditions, such as the use of different materials for the surface of the tube or working with different temperatures of the work fluid that flows in the interior of the tubes. Finally, all the data obtained by this simulations will be exported to MATLAB, where this will be post-processed obtaining the results.

Through these simulations, we can conclude that the separation between the tubes has more effect than the distance between the tubes and the wall, obtaining that the gradients of temperatures produced in the surface of the tube decrease when the separation between the different tubes increase.

Key words: Solar receiver, solar energy, tower, temperature, absorbed tube, CFD simulation

Índice

Resumen.....	IV
Abstract	V
Índice de figuras	VIII
Índice de tablas	X
Nomenclatura.....	XI
1 Introducción y objetivos.....	1
1.1 Motivación	1
1.2 Energía solar.....	3
1.2.1 Energía solar térmica.....	4
1.3 Centrales de energía solar térmica	5
1.3.1 Receptores lineales Fresnel.....	5
1.3.2 Captadores cilindro-parabólicos	6
1.3.3 Discos parabólicos.....	6
1.3.4 Centrales de torre	7
1.4 Tipos de centrales de torre y funcionamiento.....	8
1.4.1 Centrales de un solo circuito.....	8
1.4.2 Centrales solares con dos circuitos	8
1.5 Componentes de las centrales termosolares de tipo torre	9
1.5.1 Campo de heliostatos.....	9
1.5.2 Receptor	10
1.5.3 Sistema de almacenamiento	12
1.5.4 Bloque de potencia	12
1.6 Objetivo del proyecto.....	13
1.7 Estructura del documento.....	13
2 Problemas en los receptores termosolares convencionales.....	15
2.1 Receptor cilíndrico convencional	15
2.2 Problemas en el receptor	16
2.2.1 Material del receptor	17
2.2.2 Fluidos de trabajo.....	18
3 Simulación numérica CFD.....	19
3.1 Descripción de la geometría.....	19



3.1.1	Creación de la geometría	20
3.1.2	Creación de la malla	21
3.2	Simulación CFD	24
3.2.1	Análisis de la geometría	24
3.2.2	Post-procesado de datos.....	28
4	Resultados	29
4.1	Caso nominal	29
4.2	Variación de la geometría	30
4.2.1	Efecto de la separación lateral	30
4.2.2	Efecto de la separación lateral	32
4.3	Variación del material	36
4.4	Variación de la temperatura del fluido de trabajo.....	38
5	Presupuesto del proyecto	41
5.1	Costes de material.....	41
5.2	Costes de personal	41
5.3	Costes totales	42
6	Planificación del proyecto	43
6.1	Diagrama de Gantt del proyecto	44
7	Conclusiones y trabajos futuros.....	45
7.1	Conclusiones.....	45
7.2	Trabajos futuros	46
8	Bibliografía	47
Anexos	50
	Código de Matlab utilizado	50

Índice de figuras

Figura 1: Objetivos consumo de energía [1]	2
Figura 2: Estructura de potencia instalada en España [2]	3
Figura 3: Sistema de calentamiento de agua doméstico vía solar [7]	4
Figura 4: Planta de generación de energía solar térmica de media temperatura [8]	4
Figura 5: Planta de generación de energía de alta temperatura [9]	4
Figura 6: Receptores Fresnel [12]	5
Figura 7: Captador cilindro parabólico [14]	6
Figura 8: Receptor disco parabólico [16]	7
Figura 9: Central termosolar de tipo torre [18]	7
Figura 10: Funcionamiento central termosolar de circuito simple [20]	8
Figura 11: Funcionamiento central termosolar de 2 circuitos [23]	9
Figura 12: Configuración heliostatos: Configuración norte, izquierda. Configuración circular, derecha [26]	10
Figura 13: Plataforma solar PS20, Sanlúcar la Mayor (Sevilla) [27]	10
Figura 14: Planta Gemasolar, Fuentes de Andalucía (Sevilla) [28]	10
Figura 15: Receptor exterior (Gemasolar) [22]	11
Figura 16: Receptor plano (Plataforma solar PS20) [29]	11
Figura 17: Esquema funcionamiento sistema de almacenamiento [31]	12
Figura 18: Esquema del bloque de potencia [32]	13
Figura 19: Receptor cilíndrico con uno de los paneles separado del resto para facilitar su visualización [25]	15
Figura 20: Ocho posibles configuraciones del flujo del fluido para un receptor cilíndrico [33] ..	16
Figura 21: Panel del receptor de la central Solar Two [34]	17
Figura 22: Geometría básica del tubo del receptor	19
Figura 23: Geometría del tubo y el receptor	20
Figura 24: Ejemplo de mallado de la geometría	22
Figura 25: Comparación de resultados entre mallado normal y mallado fino	23
Figura 26: Zonas en las que se divide la geometría	23
Figura 27: Contorno de temperaturas en la geometría del receptor	27
Figura 28: Contorno de radiación incidente en la geometría del receptor	27
Figura 29: Contorno de flujo de calor en la geometría del receptor	28
Figura 30: Gráficas de temperatura, radiación incidente y flujo de calor para una geometría de $Sl=5\%$ y $St=5\%$	30
Figura 31: Gráficas de temperatura para una geometría con una distancia $St=5\%$ fija, variando Sl con unos valores de 3%, 5% y 7%	31
Figura 32: Gráficas de radiación incidente para una geometría con una distancia $St=5\%$ fija, variando Sl con unos valores de 3%, 5% y 7%	31
Figura 33: Gráficas de flujo de calor para una geometría con una distancia $St=5\%$ fija, variando Sl con unos valores de 3%, 5% y 7%	32
Figura 34: Gráficas de temperatura para una geometría con una distancia $Sl=3\%$ fija, variando St con unos valores de 3%, 5% y 7%	33



Figura 35: Gráficas de temperatura para una geometría con una distancia $Sl=7\%$ fija, variando St con unos valores de 3%, 5% y 7%	33
Figura 36: Gráficas de radiación incidente para una geometría con una distancia $Sl=3\%$ fija, variando St con unos valores de 3%, 5% y 7%	34
Figura 37: Gráficas de radiación incidente para una geometría con una distancia $Sl=7\%$ fija, variando St con unos valores de 3%, 5% y 7%	34
Figura 38: Gráficas del flujo de calor para una geometría con una distancia $Sl=3\%$ fija, variando St con unos valores de 3%, 5% y 7%	35
Figura 39: Gráficas del flujo de calor para una geometría con una distancia $Sl=7\%$ fija, variando St con unos valores de 3%, 5% y 7%	35
Figura 40: Variación de temperatura según el ángulo para diferentes geometrías distintas con una temperatura de fluido de trabajo de 700K	36
Figura 41: Gradiente de temperaturas para $Sl=St=7\%$ con Incoloy 800H (izquierda) y con Inconel alloy 625 (derecha)	37
Figura 42: Radiación incidente para $Sl=St=7\%$ con Incoloy 800H (izquierda) y con Inconel alloy 625 (derecha)	37
Figura 43: Flujo de calor para $Sl=St=7\%$ con Incoloy 800H (izquierda) y con Inconel alloy 625 (derecha)	38
Figura 44: Temperatura de los tubos del receptor para $Sl=8\%$ y $St=7\%$ aplicando variaciones de temperatura en el fluido de trabajo, 700K (izquierda), 750K (centro) y 800K (derecha)	39
Figura 45: Radiación incidente en los tubos del receptor para $Sl=8\%$ y $St=7\%$ aplicando variaciones de temperatura en el fluido de trabajo, 700K (izquierda), 750K (centro) y 800K (derecha)	40
Figura 46: Flujo de calor en los tubos del receptor para $Sl=8\%$ y $St=7\%$ aplicando variaciones de temperatura en el fluido de trabajo, 700K (izquierda), 750K (centro) y 800K (derecha)	40



Índice de tablas

Tabla 1: Valores de las separaciones de los tubos	21
Tabla 2: Comparación entre mallado normal y mallado fino.....	22
Tabla 3: Propiedades materiales del tubo	25
Tabla 4: Propiedades de la sal solar	29
Tabla 5: Valores de U_{tot} en función de la temperatura media del fluido de trabajo.....	39
Tabla 6: Coste de material.....	41
Tabla 7: Coste de personal	41
Tabla 8: Coste total	42
Tabla 9: Diagrama de Gantt del proyecto	44

Nomenclatura

C_p	Calor específico [$\frac{J}{Kg.K}$]
D_e	Diámetro exterior [mm]
D_i	Diámetro interior [mm]
h	Coeficiente de convección [$W/m^2.K$]
k	Conductividad [$W/m.K$]
L	Altura del receptor [m]
\dot{m}_{tubo}	Flujo másico [kg/s]
Nu_d	Número de Nusselt [-]
Pr	Número de Prandtl [-]
$q_{rad''}$	Flujo de calor de radiación [W/m^2]
Re	Número de Reynolds [-]
R_{ens}	Resistencia de ensuciamiento [$\frac{m^2.K}{W}$]
s_d	Distancia entre el tubo y la zona delantera del mallado [m]
s_l	Distancia lateral entre tubos [m]
s_t	Distancia entre el tubo y la pared trasera [m]
T	Temperatura [$^{\circ}C$, K]
\bar{T}	Temperatura media del fluido [$^{\circ}C$, K]
$t_{depreciacion}$	Tiempo de depreciación [meses]
U_{tot}	Coeficiente de transferencia de calor [$\frac{W}{m^2.K}$]
V_{fluido}	Velocidad del fluido [m/s]
ρ	Densidad [kg/m^3]
μ	Viscosidad dinámica [Pa/s]
ξ	Emisividad [-]
σ	Constante de Stefan-Boltzmann [$W/m^2.K^4$]



1 Introducción y objetivos

En este capítulo se va a explicar de forma general el tema sobre el que se desarrolla este proyecto. Para ello, se va a hablar sobre los distintos tipos de energía solar, enfocándose en la tecnología de concentración termosolar de torre además de la motivación que ha hecho que este proyecto se materialice. Por último, se van a tratar los objetivos que se pretenden obtener con la realización de este proyecto y los beneficios que éste podría aportar.

1.1 Motivación

Hoy en día, la escasez de combustibles fósiles y los problemas medioambientales que estos provocan para producir energía a través de las emisiones y residuos que estos generan, están provocando que haya que buscar fuentes de energía alternativas limpias e inagotables.

Por esta razón, es necesaria una migración de las energías que se utilizan actualmente para producir electricidad, como pueden ser el carbón, el petróleo, la energía nuclear... hacia el uso de energías que provengan de fuentes renovables, como la energía solar, eólica, hidráulica... Por eso el desarrollo de las energías renovables es fundamental, ya que la demanda de energía que provenga de fuentes renovables es cada vez más alta. Para ello, la Unión Europea estableció una serie de medidas medioambientales, en las que se comprometía a promover el uso de energías renovables, poniendo objetivos a cada país sobre el porcentaje de energía que deben producir de forma renovable [1]. Estos objetivos se pueden ver a continuación en la Figura 1. En ellos se destaca el objetivo de España, ya que para 2020 tiene un objetivo de que el 20% de la energía total producida en el país provenga de fuentes renovables.

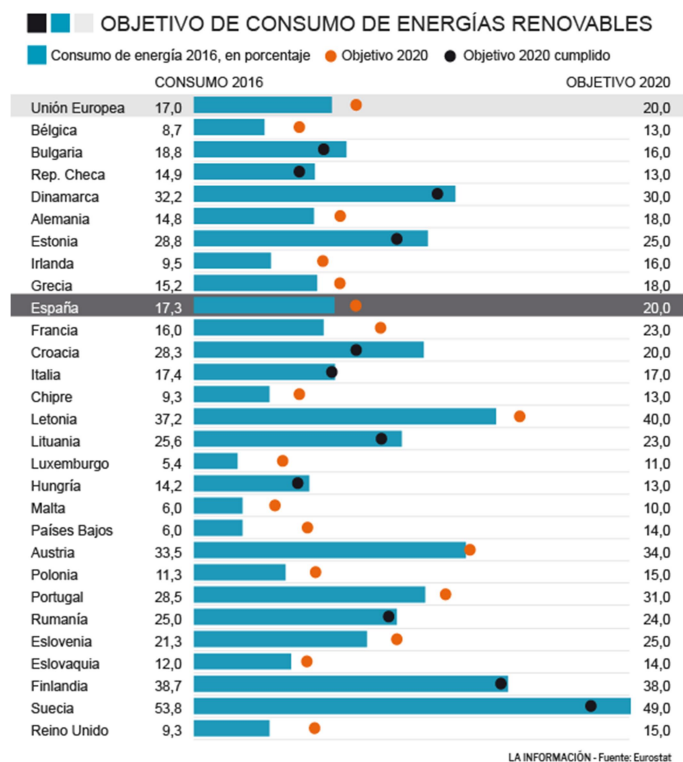


Figura 1: Objetivos consumo de energía [1]

Una de las principales fuentes de energía renovables es la energía solar. Esta utiliza el Sol como fuente para generar energía, distinguiéndose dos tipos principales, la energía solar fotovoltaica y la energía solar térmica. Dentro de los tipos de energía solar disponibles a día de hoy, una de las más prometedoras es la energía solar de tipo torre debido a su alta capacidad de generación de energía y a su elevado rendimiento.

Las centrales solares de tipo torre se encargan de concentrar la radiación solar en un receptor por el que circula un fluido. Esto hace que el fluido se caliente y al entrar en un intercambiador de calor se genere vapor que mueve las turbinas que generan electricidad. Aunque este tipo de energía represente únicamente un 2.2% del consumo de energía [2] (Se puede observar en la Figura 2), es una tecnología que se encuentra en desarrollo y se espera que su uso aumente en los próximos años.

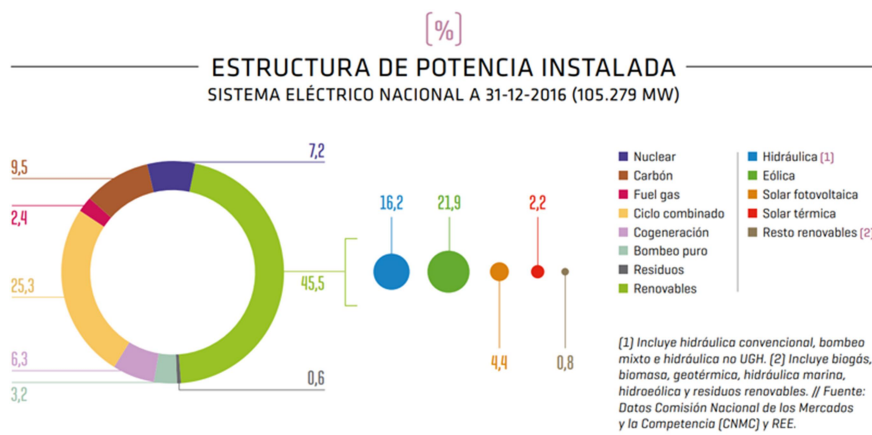


Figura 2: Estructura de potencia instalada en España [2]

1.2 Energía solar

La energía solar es aquella que utiliza el Sol como fuente de energía. Esta es una de las principales fuentes de energía renovable, debido a que goza de numerosos beneficios, ya que, además de ser una fuente de energía no contaminante, puede usarse en puntos aislados para dotar de electricidad a la población de estos puntos sin tener que realizar una gran inversión en infraestructura. De esta manera se puede ver que la energía solar se puede aprovechar tanto para la generación de electricidad a pequeña escala como a gran escala mediante la construcción de centrales solares.

Otro de los beneficios de la energía solar es su versatilidad, ya que se puede aprovechar de dos maneras diferentes dependiendo de qué manera se aproveche la radiación [3]:

- **Energía solar fotovoltaica:** Este tipo de energía solar se sirve de células fotovoltaicas como herramienta. Utilizando el efecto fotoeléctrico, estas células captan los fotones procedentes de la luz solar para posteriormente liberar electrones y producir de esta manera corriente eléctrica.
- **Energía solar térmica:** Como su propio nombre indica, este tipo de tecnología utiliza el calor proveniente del Sol para generar energía. Este calor se puede aprovechar de diferentes maneras. Esta energía se puede aprovechar utilizando paneles para absorber el calor, siendo esta tecnología utilizada en sistemas de calentamiento de agua sanitaria [4]. A mayor escala, la energía solar térmica se aprovecha utilizando espejos (heliostatos) que concentran la energía procedente del Sol en un mismo punto, en el que se encontrará un receptor que, mediante un ciclo termodinámico, genera energía eléctrica con el uso de una turbina y un alternador.

1.2.1 Energía solar térmica

El uso de la energía solar térmica se ha producido a lo largo de gran parte de la historia, pero su desarrollo para producir electricidad se inició en la década de los 70 a partir de la crisis del petróleo, que hizo que se impulsase el desarrollo de formas de energía que no conllevasen el uso de combustibles fósiles [5]. A partir de entonces se ha desarrollado a lo largo de los años.

Este tipo de energía es muy versátil, ya que puede ser utilizada desde el ámbito doméstico hasta la producción de electricidad a gran escala [6]. Para cada una de estas variantes de energía térmica se necesitan diferentes tipos de colectores.

- Energía solar de baja temperatura: El colector obtiene temperaturas de hasta 65-80°C. Es utilizada en el ámbito doméstico para la obtención de agua caliente sanitaria (ACS) o para calentar el agua que circulará en sistemas de calefacción. En la Figura 3 se muestra un ejemplo de este tipo de instalaciones.
- Energía solar de temperatura media: El colector alcanza unas temperaturas entre 80°C y 300°C. Se utiliza sobre todo en procesos industriales y para producir energía eléctrica a pequeña escala. En la Figura 4 se muestra una planta de generación de energía solar térmica cilindro-parabólica, la cual utiliza energía solar de temperatura media.
- Energía solar de alta temperatura: El colector requiere de temperaturas de en torno a 500°C, la principal función de este tipo de energía es la obtención de electricidad a gran escala. Este método de obtención de electricidad se denomina energía termosolar, calienta un fluido a muy alta temperatura gracias a la radiación solar concentrada en el receptor. En la Figura 5 se muestra una central solar de tipo torre, la cual genera electricidad a partir de energía solar de alta temperatura.



Figura 3: Sistema de calentamiento de agua doméstico vía solar [7]



Figura 4: Planta de generación de energía solar térmica de media temperatura [8]



Figura 5: Planta de generación de energía de alta temperatura [9]

1.3 Centrales de energía solar térmica

La generación de electricidad mediante el uso de energía solar térmica se produce en las centrales termosolares, en estas, el calor que proviene de la radiación solar se aprovecha para generar electricidad haciendo que este calor aumente la temperatura de un fluido. En el caso de que este fluido sea agua, se generará vapor que se hará pasar por turbinas para generar electricidad. En el caso de que este fluido no sea agua, se le hará pasar por un intercambiador de calor que calentará el vapor para producir la electricidad.

En cuanto a las centrales termosolares, existen diferentes tipos en función de la manera en la que concentran la radiación solar [10]:

- Receptores lineales Fresnel
- Captadores cilindro-parabólicos
- Discos parabólicos
- Centrales de torre

1.3.1 Receptores lineales Fresnel

La tecnología de los receptores solares Fresnel consiste en un sistema foco-lineal, esto quiere decir que la radiación procedente del Sol será concentrada, gracias a los espejos que componen el sistema, en una línea, el receptor.

Este sistema consta de unos espejos planos, que varían su orientación a lo largo del día mediante un eje para que la radiación se concentre en el tubo del receptor. Esta energía hará que el fluido que circula por el interior del tubo se caliente. Las principales ventajas de los receptores Fresnel son que su sistema es sencillo y tiene un bajo coste, por el contrario, su rendimiento no es tan alto como el de otros tipos de energía termosolar [11]. A continuación se muestra un ejemplo de este tipo de receptor solar en la Figura 6.



Figura 6: Receptores Fresnel [12]

1.3.2 Captadores cilindro-parabólicos

La tecnología del captador cilindro-parabólico es similar a la de los receptores Fresnel, con la diferencia de que en estos se utiliza un solo reflector curvado (Cilindro-parabólico). En este tipo de captadores se utiliza un sistema de seguimiento que hace que el espejo gire en función de la dirección en la que la radiación solar esté incidiendo [13].

Esta radiación que incide sobre el receptor se refleja a lo largo de la línea focal. En esta línea es donde se encuentra el receptor por el que circula el fluido, haciendo que este se caliente con el fin de utilizarlo para la generación de energía eléctrica. Usando esta tecnología, las plantas de este tipo generan entre 50 y 300 MW de potencia. En la Figura 7 se puede ver un receptor de este tipo.



Figura 7: Captador cilindro parabólico [14]

1.3.3 Discos parabólicos

El sistema de disco parabólico consta de una superficie de espejo en forma parabólica con un sistema de seguimiento del Sol, de esta manera se alcanzan unas temperaturas muy altas, provocando que la eficiencia sea muy alta [15].

En el foco del espejo se encuentra el receptor donde se concentra la radiación solar. Aquí es donde se coloca el sistema que aprovecha la energía térmica. Lo habitual es que se sitúe un motor Stirling para transformar esta energía incidente en energía mecánica, que a través de un alternador, se convertirá en energía eléctrica. Aunque el rendimiento de este tipo de tecnología sea elevado, la implantación de este sistema es complicada a gran escala debido a la complejidad de la geometría del espejo y la necesidad de colocar motores en cada uno de los espejos. A continuación en la Figura 8 se muestra una imagen de una central en la que se utilizan receptores de discos parabólicos.



Figura 8: Receptor disco parabólico [16]

1.3.4 Centrales de torre

El funcionamiento de las centrales de torre se basa en el uso heliostatos (espejos orientables) que reflejan la radiación solar y la concentran en un receptor solar situado en lo alto de la torre. A través de estos receptores circula un fluido que se calentará y se utilizará para generar vapor sobrecalentado. Este vapor pasará a través de unas turbinas para producir electricidad.

La principal ventaja de este tipo de tecnología es que puede generar una gran cantidad de potencia de forma continuada debido a que tienen capacidad de almacenamiento de energía. Sin embargo, al principio estas centrales no gozaban de una gran popularidad, pero la tecnología necesaria para su construcción se ha ido desarrollando a lo largo de los últimos años [17]. Esto ha hecho que en la década de los años 2000 se empezaran a instalar estas plantas de manera comercial y comenzase una etapa de desarrollo, en la que hoy en día nos encontramos ya que hay muchas centrales en planificación y construcción en todo el mundo. Un ejemplo de estos tipos de centrales es la planta Gemasolar de Sevilla, que se muestra a continuación en la Figura 9.



Figura 9: Central termosolar de tipo torre [18]

1.4 Tipos de centrales de torre y funcionamiento

El funcionamiento de este tipo de centrales se basa en concentrar la radiación solar en el receptor, usando los heliostatos para ello. Esto hará que el fluido de trabajo que pasa por el interior del receptor se caliente. Actualmente predomina el uso de sales fundidas como fluido de trabajo, pero también pueden usarse metales fundidos, vapor, etc.

Dependiendo de cómo funcionen los circuitos por los que circula el fluido de trabajo podemos distinguir entre centrales de un solo circuito, y centrales con dos circuitos relacionados entre sí a partir de un intercambiador de calor.

1.4.1 Centrales de un solo circuito

En este tipo de plantas se utiliza vapor de agua como fluido de trabajo. De esta manera el vapor alcanza temperaturas de alrededor de 500°C. De esta manera la central opera con un ciclo Rankine y tiene el beneficio de que el vapor sobrecalentado pasa directamente a la turbina para generar energía [19]. Además, a este tipo de plantas se les pueden añadir sistemas de almacenamiento de vapor con el fin de poder almacenar energía para utilizarla cuando no haya radiación solar incidiendo sobre el campo de heliostatos. No obstante, la capacidad de almacenamiento de energía es relativamente baja [17]. En la Figura 10 se muestra un esquema del funcionamiento de centrales solares de tipo torre de un solo circuito.

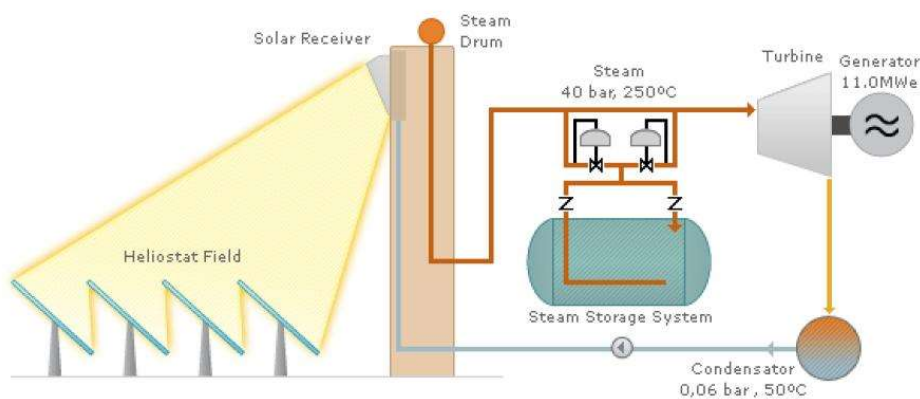


Figura 10: Funcionamiento central termosolar de circuito simple [20]

1.4.2 Centrales solares con dos circuitos

En este tipo de plantas, el fluido de trabajo se encuentra en primer lugar en un tanque de almacenamiento del fluido frío y se bombea hasta la torre, pasando por el receptor y recibiendo la radiación concentrada, lo que provoca que éste se caliente. Posteriormente, el fluido se lleva a un segundo tanque de almacenamiento, donde se almacena el fluido caliente. Este fluido se lleva a través del circuito secundario a un intercambiador de calor, donde se

utilizará para calentar el vapor que se utilizará para mover las turbinas y generar así electricidad [21].

De esta manera, se logra prolongar el tiempo de almacenamiento, este es el sistema que utiliza la planta Gemasolar de Sevilla, cuyo almacenamiento de sales solares a alta temperatura se prolonga hasta alrededor de 15 horas [22]. Este funcionamiento se puede ver de forma gráfica en el esquema de la Figura 11.

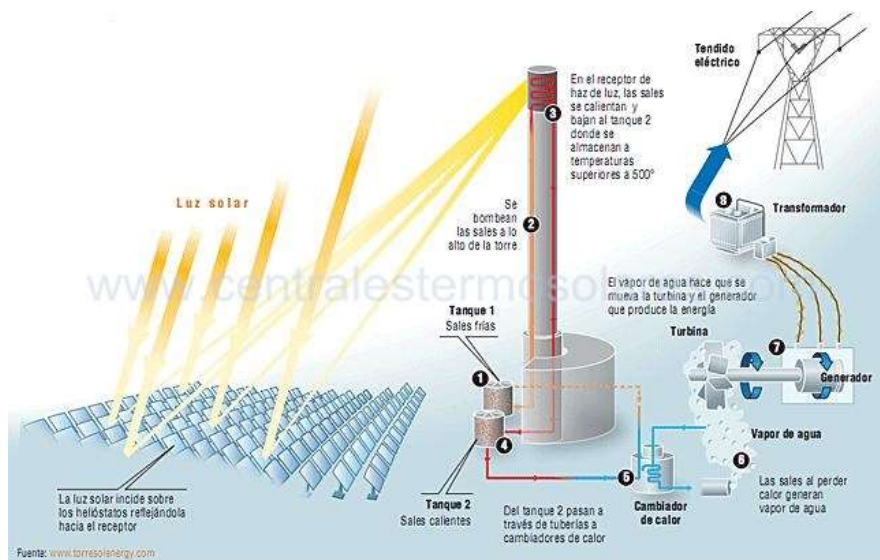


Figura 11: Funcionamiento central termosolar de 2 circuitos [23]

1.5 Componentes de las centrales termosolares de tipo torre

En este apartado se van a explicar los diferentes componentes que forman una central termosolar de tipo torre para que esta funcione.

1.5.1 Campo de heliostatos

Los heliostatos son los espejos en los que se refleja la radiación procedente del Sol para concentrarla en el receptor. La distribución del campo depende del tipo de receptor que se utilice en la planta. Si el receptor es plano, el campo se colocará al norte de la torre (Al sur si nos encontramos en el hemisferio sur). Sin embargo, si el receptor es circular, los heliostatos se colocan alrededor de la torre. En la Figura 12 se pueden ver ejemplos sobre las diferentes configuraciones del campo de heliostatos [24].

Esta configuración debe ser optimizada para evitar que entre los heliostatos se produzcan bloqueos y sombras entre sí, ya que esta es la parte de la central que requiere más inversión económica (Alrededor del 40% de los costes van destinados al campo de heliostatos) [25].

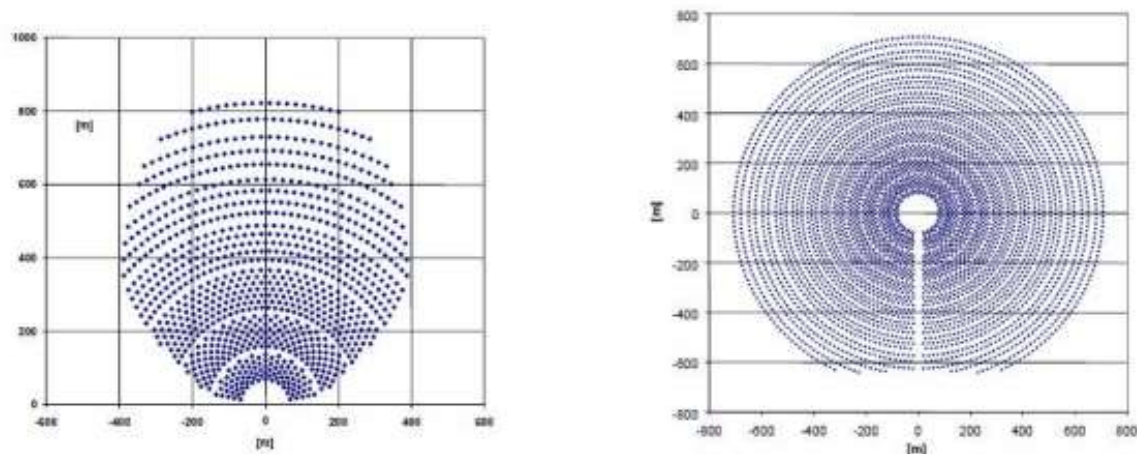


Figura 12: Configuración heliostatos: Configuración norte, izquierda. Configuración circular, derecha [26]

En España disponemos de centrales termosolares de tipo torre con ambas configuraciones del campo de heliostatos. Éstas se pueden ver tanto en la Figura 13 (Configuración norte) como en la Figura 14 (Configuración circular).



Figura 13: Plataforma solar PS20, Sanlúcar la Mayor (Sevilla) [27]



Figura 14: Planta Gemasolar, Fuentes de Andalucía (Sevilla) [28]

1.5.2 Receptor

El receptor es la parte de la central que va a recibir la radiación concentrada procedente del campo de heliostatos y, por tanto, donde se va a producir el calentamiento del fluido de trabajo. Este va colocado en lo alto de la torre y es la parte más sensible de la central y se necesitará el uso de materiales que soporten estos esfuerzos.

Existen distintos tipos de receptor dependiendo de su geometría, siendo los dos principales el receptor exterior y el receptor plano.

- **Receptor exterior:** La configuración de este receptor es cilíndrica, pudiendo obtener radiación de todas las direcciones, por tanto, su campo de heliostatos tendrá una disposición circular. En ellos se alcanzan unas temperaturas de alrededor de 600°C.



Figura 15: Receptor exterior (Gemasolar) [22]

- **Receptor plano:** En este tipo de receptores, los tubos por los que circula el fluido de trabajo se encuentran dentro de una cavidad. Esta aísla a los tubos del exterior, pero hace que se pueda recibir radiación solar de una sola dirección, siendo necesaria una configuración norte para el campo de heliostatos.



Figura 16: Receptor plano (Plataforma solar PS20) [29]

1.5.3 Sistema de almacenamiento

En las centrales donde se utilizan dos circuitos, se incluye este sistema. Su función es almacenar el fluido de trabajo en unos tanques aislados térmicamente para que así la central pueda generar electricidad fuera de las horas de Sol [25].

En el esquema de la Figura 17 se puede ver que este sistema consta de dos tanques de almacenamiento, uno con el fluido frío (antes de pasar por el receptor), y otro con fluido caliente, que será utilizado para calentar vapor y, tras esto, se reconducirá al tanque de fluido frío para comenzar de nuevo el ciclo de trabajo. Gracias a este sistema de almacenamiento, se puede guardar sal a alta temperatura para calentar el vapor que pasará por las turbinas haciendo que se pueda generar electricidad en la central aunque no haya Sol. Esto se aplica en numerosas centrales termosolares de tipo torre, como por ejemplo la central de Crescent Dunes, situada en Nevada, Estados Unidos, cuya capacidad de almacenamiento permite que la central tenga una autonomía de 10 horas para generar electricidad sin que el Sol incida [30], o la central de Gemasolar, situada en Sevilla, cuya capacidad de almacenamiento la permite funcionar hasta 15 horas sin Sol [22].

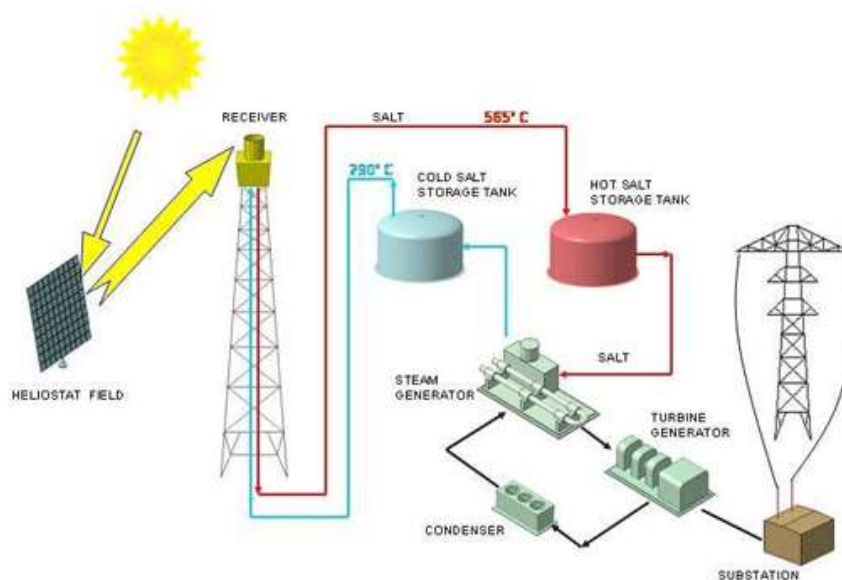


Figura 17: Esquema funcionamiento sistema de almacenamiento [31]

1.5.4 Bloque de potencia

En el bloque de potencia es donde se produce la generación de energía. El ciclo de potencia que se produce en el bloque es similar al ciclo Rankine ideal [25]. En él, se produce una compresión del fluido mediante el uso de una bomba, tras esto, el vapor de agua se calienta en el intercambiador de calor gracias al calor que cede el fluido de trabajo. Posteriormente, se hace pasar al vapor a través de la turbina, lo que hará que se genere electricidad gracias a un alternador. En este punto se produce una expansión del fluido. Por último, al vapor se le hace pasar por un condensador haciendo que se alcance el estado de líquido saturado del fluido

para poder volver a iniciar de nuevo el ciclo de generación de potencia. El funcionamiento del ciclo de potencia se puede ver a continuación en la Figura 18.

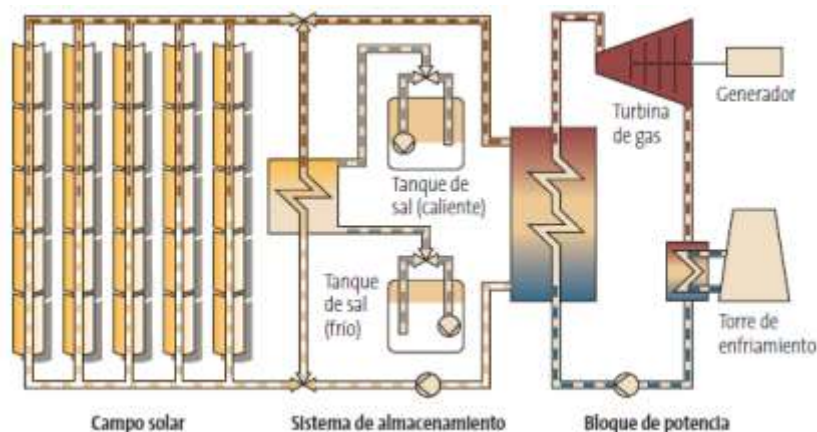


Figura 18: Esquema del bloque de potencia [32]

1.6 Objetivo del proyecto

El objetivo de este proyecto es realizar un análisis por el que se determine una geometría óptima para la separación de estos tubos entre la pared trasera del receptor y entre los tubos adyacentes.

Para ello se va a utilizar el software ANSYS Workbench, con el que se crearán diferentes geometrías variando los valores de las separaciones que se han descrito anteriormente. Posteriormente, con ayuda del módulo Fluent que se encuentra dentro de Workbench se realizarán diferentes simulaciones del comportamiento de estos tubos dependiendo de las condiciones de contorno con las que se realiza el análisis. Tras esto, se obtendrán una serie de datos que se exportarán a MATLAB para realizar un post-procesado de estos, de esta manera se analizarán los datos obtenidos de las simulaciones y se obtendrán una serie de resultados.

1.7 Estructura del documento

Este trabajo final de grado presenta un estudio sobre la separación óptima de los tubos que pasan por el receptor de una central termosolar de tipo torre para reducir en la medida de lo posible los gradientes de temperatura que se producen en el tubo que acaban ocasionando la rotura de estos obligando a parar las centrales. Este trabajo se organiza en 7 capítulos.

- **Capítulo 1: Introducción y objetivos:** En este capítulo se explica el funcionamiento de los diferentes tipos de centrales solares térmicas, centrándose en las centrales de tipo torre. Explicando su funcionamiento y sus componentes. Además de esto se expone la motivación que ha llevado a la realización de este proyecto



- **Capítulo 2: Problemas en los receptores termosolares convencionales:** Este capítulo se va a centrar en el receptor de la central. En él se explicará el funcionamiento de este y los principales problemas que le afectan, además del objetivo del proyecto.
- **Capítulo 3: Simulación numérica CFD:** En este capítulo se realizará una descripción de los procesos realizados en el análisis de este problema. Posteriormente se comentarán los diferentes resultados que se han obtenido y las conclusiones a las que se ha llegado.
- **Capítulo 4: Presupuesto del proyecto:** Aquí se realizará una estimación económica de los costes relativos a la realización del proyecto.
- **Capítulo 5: Planificación del proyecto:** Este capítulo consistirá en la descripción de las diferentes etapas realizadas para la consecución de este proyecto. Además se incluye un diagrama de Gantt en el que se puede ver de forma gráfica el tiempo empleado para cada una de las tareas.
- **Capítulo 6: Conclusiones y trabajos futuros:** En este capítulo se comentarán los resultados principales del proyecto y las conclusiones a las que se han llegado. Además, se comentarán posibles trabajos que se pueden realizar a continuación de este para seguir implementando mejoras a las centrales termosolares de tipo torre.
- **Capítulo 7: Bibliografía:** Este capítulo consiste en una lista de referencias que se han utilizado a lo largo de la realización del trabajo.
- **Anexos:** En este apartado se mostrará el código MATLAB que se ha utilizado para realizar el post-procesado de las simulaciones realizadas.

2 Problemas en los receptores termosolares convencionales

En este capítulo se va a explicar el funcionamiento de los receptores de las centrales termosolares de tipo torre.

Además de esto, se explicarán los problemas que tienen estos receptores debido a los altos gradientes térmicos y a la corrosión que se produce en el interior del tubo, que provocan la rotura del receptor.

2.1 Receptor cilíndrico convencional

Este tipo de receptores consiste en una serie de paneles planos que se colocan juntos a lo alto de la torre, haciendo que tengan una disposición cilíndrica. A su vez, estos paneles están formados por una serie de tubos por los que circulará el fluido que se quiere calentar [33]. En la Figura 19 se puede ver un ejemplo de un receptor cilíndrico.

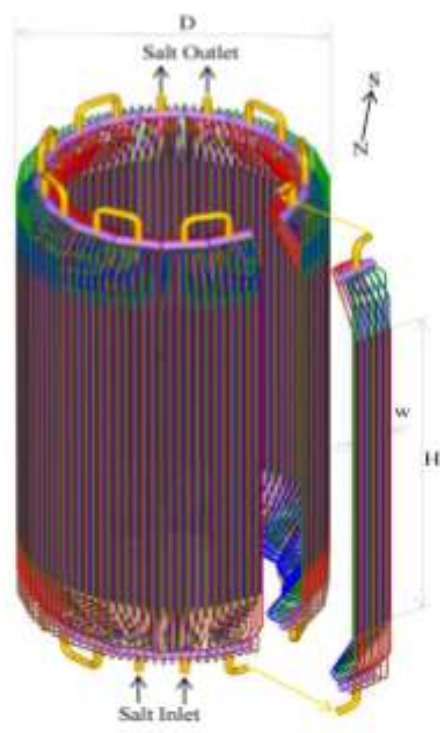


Figura 19: Receptor cilíndrico con uno de los paneles separado del resto para facilitar su visualización [25]

La principal ventaja de este tipo de configuración es que se puede recibir la radiación concentrada desde 360° ya que el campo de heliostatos de las centrales con este tipo de receptor tiene configuración circular, sin embargo, los paneles que forman el cilindro, a diferencia de los receptores planos, en los que el fluido circula por una cavidad que aísla a los

tubos del exterior, están expuestos a las condiciones ambientales, por tanto, su eficiencia térmica es menor.

Dentro de este tipo de receptores, la configuración del fluido de trabajo puede variar, ya que este puede entrar por un panel o por dos paneles distintos, en la Figura 20 se pueden observar ocho posibles configuraciones para el flujo del fluido.

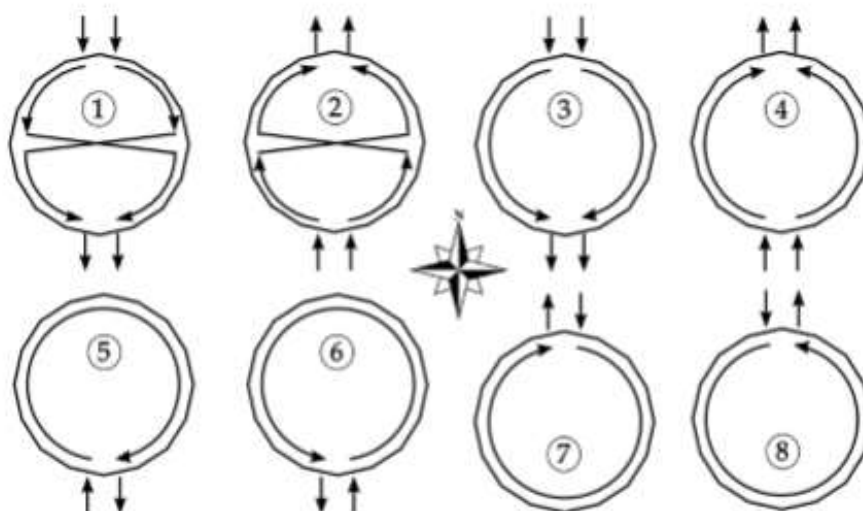


Figura 20: Ocho posibles configuraciones del flujo del fluido para un receptor cilíndrico [33]

En su tesis [33], Wagner concluyó que las configuraciones más eficientes eran las configuraciones en las que el fluido de trabajo entraba por dos paneles distintos.

2.2 Problemas en el receptor

La principal desventaja de este tipo de receptores es el gradiente de temperaturas de los tubos del receptor. En el lado donde incide la radiación solar concentrada directamente desde el campo de heliostatos la temperatura es significativamente mayor que en la parte trasera del tubo, lo que provoca fatiga en el tubo. A este problema se le suma que el fluido de trabajo que pasa por su interior provoca corrosión en el interior del tubo. Estas condiciones tan severas a las que se somete el receptor hacen que este sea el punto más crítico de la planta.

Estas condiciones provocan la rotura de los tubos del receptor, para repararlos es necesario parar la central y sustituir los tubos que forman los diferentes paneles del receptor, que se pueden apreciar en la Figura 21. Por tanto, este proceso tiene un coste elevado no solo por los costes de reparación, sino porque obliga a parar la central durante la reparación haciendo que esta deje de producir energía.



Figura 21: Panel del receptor de la central Solar Two [34]

Este proceso es muy costoso ya que de todos los costes de construcción de la central, tanto fijos como variables, el receptor presenta aproximadamente el 17% [35]. Por tanto, es importante buscar una serie de alternativas que reduzcan la posibilidad de que los tubos rompan.

2.2.1 Material del receptor

Como se ha comentado en el punto anterior, el receptor es la parte de la central que va a sufrir las condiciones más severas, por tanto la elección del material que compone el receptor es fundamental para evitar problemas de fatiga, provocados por la radiación concentrada que incide sobre éste y problemas de corrosión, provocados por el fluido de trabajo que lo atraviesa [25].

Para soportar estas condiciones, los materiales que se utilizan para los receptores son aceros inoxidables y aleaciones con base de níquel. De esta forma, los materiales más utilizados para los receptores son:

- **Acero inoxidable 316:** El acero inoxidable fue uno de los primeros materiales en usarse para los receptores de las centrales termosolares de torre debido a que sus propiedades térmicas y mecánicas lo hacen adecuado para estas temperaturas y tiene un bajo coste (2.5-5 \$/kg). Sin embargo, este material desarrolla problemas de corrosión causados por el fluido a lo largo de los años.
- **Inconel alloy 625:** Está formado principalmente por una aleación de níquel (58%) y cromo (20-23%) además de otros materiales en menor medida. Es el material más utilizado hoy en día para la aplicación en receptores solares debido a su excepcional

resistencia a la oxidación y a la fatiga provocada por esfuerzos térmicos [36]. Su precio ronda los 20-25 \$/kg.

- **Incoloy 800H:** Está formado por una aleación de níquel (30-35%) y de cromo (19-23%) principalmente. Tiene una alta resistencia a la oxidación y a la fatiga e incluso ha sido el material utilizado en varias centrales solares de torre [37]. Aunque su precio es muy elevado, disparando los costes de la central (30-60\$/kg).

2.2.2 Fluidos de trabajo

El funcionamiento de la central dependerá en gran medida del fluido de trabajo, ya que este es el que va a ser calentado por el efecto de la radiación concentrada y, por tanto, va a ser responsable de la producción del vapor.

Este fluido debe de tener unas características concretas, ya que debe poder soportar unas condiciones muy severas [25]. Este debe tener un punto de fusión relativamente bajo y un punto de ebullición alto, además de una baja viscosidad y una elevada conductividad térmica. Todo ello sin que su precio sea demasiado elevado para no incrementar en gran medida los costes de la central, ya que se necesitarán grandes cantidades de este fluido

Los fluidos de trabajo que gozan de una mayor importancia en las centrales termosolares de tipo torre son:

- **Metales fundidos:** Las ventajas principales del uso de metales fundidos como fluido de trabajo son sus elevados valores de conductividad térmica y su amplio rango de temperaturas de trabajo. Sin embargo, los metales fundidos provocan severos problemas de corrosión y problemas de seguridad en el sistema de almacenamiento. Esto hace que su coste, tanto de producción como el de mantenimiento sean muy elevados para utilizarlo en aplicaciones comerciales.
- **Sales fundidas:** A partir de una mezcla de un 60% de NaNO_3 y un 40% de KNO_3 se obtiene lo que se conoce como Sal Solar. Las características de esta sal la convierten en una buena alternativa para su uso como fluido de trabajo, además la hacen un fluido conveniente para almacenar el calor en tanques, además tiene un precio de 1\$/kg aproximadamente. Estas características hace que sea un fluido adecuado.
- **CO_2 supercrítico:** Las características de este fluido hacen que se pueda trabajar con unas presiones y temperaturas elevadas, obteniendo unos altos valores de rendimiento. Sin embargo, la generación de electricidad utilizando este fluido como fluido de trabajo se está realizando con prototipos, siendo un fluido de trabajo prometedor pero sin aplicaciones comerciales a día de hoy. [38]

3 Simulación numérica CFD

El objetivo del proyecto consiste en determinar la existencia de una geometría óptima para la separación de los tubos del receptor entre la pared trasera del receptor y entre los tubos adyacentes ante diferentes condiciones de contorno.

Para ello se va a realizar un proceso iterativo donde que comenzará por la creación de una geometría, posteriormente, a esta se le asignarán unas condiciones de contorno y se realizará su simulación a partir del software Ansys Fluent. Tras esto, los datos de la simulación se exportan a Matlab donde se les realizarán un post-procesado con el fin de analizar los datos obtenidos en la simulación.

Para la obtención de resultados se van a realizar 4 procesos principales:

- **Creación de la geometría:** Para crear la geometría se van a fijar unos valores numéricos a las distancias acotadas que se pueden ver en la Figura 22. Para ello, se han utilizado valores típicos de la separación de tubos existentes en las centrales de Gemasolar y de Crescent Dunes [25], añadiendo modificaciones en su geometría para realizar el estudio de separación de tubos.
- **Mallado de la geometría:** Tras la creación de la geometría, esta se debe mallar y definir una serie de zonas para poder realizar el análisis de la geometría.
- **Análisis de la geometría:** En este paso, se fijarán una serie de condiciones de contorno a la malla creada en el paso anterior. Tras esto, se realizará una simulación del comportamiento de esta geometría.
- **Post-procesado:** Los datos obtenidos en la simulación se exportan a Matlab para analizarlos y obtener de esta manera los diferentes resultados.

3.1 Descripción de la geometría

Para obtener la geometría óptima se va a realizar un proceso iterativo en el que se analizará en un caso nominal la geometría de un único tubo en 2D, esta geometría puede observarse en la Figura 22. En función de los resultados que se obtengan, se irán adaptando nuevas geometrías.

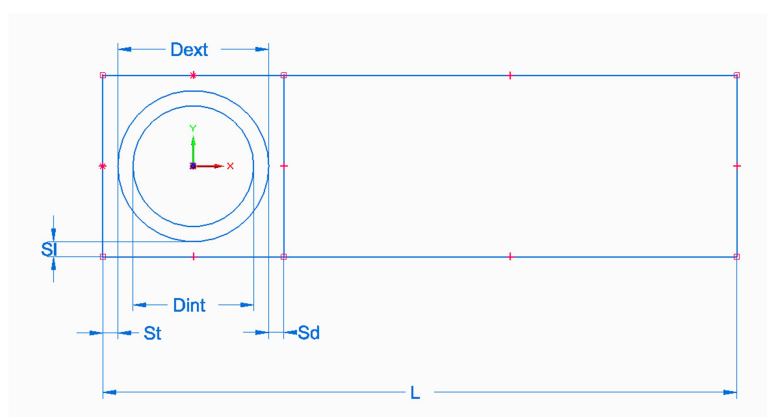


Figura 22: Geometría básica del tubo del receptor

3.1.1 Creación de la geometría

El proceso de creación y análisis de la geometría se realizará con el software **Ansys Workbench**. Dentro de este programa existen un gran número de sistemas de análisis que se pueden realizar. En el caso de este proyecto, un análisis del receptor de una central termosolar de tipo torre, se utilizará la opción **Fluid Flow (Fluent)**.

Para la creación de la geometría debemos situarnos en primer lugar sobre el módulo **Geometry** y mediante la herramienta **SpaceClaim**, se podrá crear la geometría deseada con unos valores en concreto. Esta debe ser similar a la que se puede ver en la Figura 23 (con sus correspondientes variaciones de la distancia entre los tubos y la pared trasera). Además de eso, se le añadirán a la geometría unas líneas para separar la zona de alrededor del tubo con el objetivo de poder realizar un mallado más preciso en dicha zona, ya que es la zona en la que nos interesa obtener los resultados de las simulaciones, por lo que tendrá que tener la mayor precisión posible.



Figura 23: Geometría del tubo y el receptor

Una vez se tiene realizado el contorno, se seleccionará entero y se le aplicará la condición **Fill** para que se produzca la creación de la geometría que se va a analizar. A esta se le debe quitar la parte que corresponde al interior del tubo, ya que lo que se quiere es cómo varían los diferentes valores de temperatura, flujo de calor y radiación incidente en el tubo, no en el fluido que circula por su interior.

Para la creación de la geometría se le han dado una serie de valores a las acotaciones de la Figura 22 en un plano. Como el proyecto consiste en hacer análisis a casos nominales, se escogerán unos valores fijos de D_i y D_e . Además de esto se considerará un s_d fijo, que tendrá un valor de un 5% del D_e . Por último, la longitud del receptor L se considerará igual para todos los casos.

Por tanto, los valores que se variarán serán s_t , que se corresponde con la separación existente entre el tubo y la pared trasera y s_l , que se corresponde con el valor de la separación entre tubos ($s_{tubos} = 2 \cdot s_l$). Siendo los valores los que se pueden ver a continuación en la Tabla 1:

Valores de s_t	Valores de s_l
$s_t = 2\% \cdot D_e$	$s_l = 2\% \cdot D_e$
$s_t = 3\% \cdot D_e$	$s_l = 3\% \cdot D_e$
$s_t = 4\% \cdot D_e$	$s_l = 4\% \cdot D_e$
$s_t = 5\% \cdot D_e$	$s_l = 5\% \cdot D_e$
$s_t = 6\% \cdot D_e$	$s_l = 6\% \cdot D_e$
$s_t = 7\% \cdot D_e$	$s_l = 7\% \cdot D_e$
$s_t = 8\% \cdot D_e$	$s_l = 8\% \cdot D_e$

Tabla 1: Valores de las separaciones de los tubos

A partir de estos valores se realizarán las simulaciones. Para ello se fijará una distancia de s_t y se realizará un barrido paramétrico con cada una de las distancias de s_l para ver cómo afecta la separación lateral entre tubos al receptor. Posteriormente, se fijará una distancia de s_l y se realizará un barrido paramétrico variando las distancias de s_t para así poder ver de qué forma afecta la distancia de la separación del tubo y la pared trasera del receptor.

De esta forma se dispondrá de una serie de geometrías con unas condiciones de contorno concretas que permitirán estudiar la manera en la que afectan los valores de la separación trasera y lateral de los tubos del receptor.

3.1.2 Creación de la malla

Tras la creación de la geometría es necesaria la creación de una malla para poder realizar los diferentes análisis posteriores. Para ello, se utilizará la herramienta **Mechanical** que se encuentra en el módulo **Mesh**. Al abrir esta sección lo primero que se mostrará será la geometría creada en el módulo **Geometry**, tras esto, en la sección de **Mesh** se seleccionarán las características que se deseen en el mallado.

Para el análisis de este proyecto se va a realizar una malla cuyos elementos sean de tipo Quad. Además esta malla será lo más gradual posible, evitando cambios bruscos de tamaño de unos elementos a otros. El mallado más fino se realizará en la zona próxima al tubo, ya que en esta reside la importancia del trabajo debido a que es aquí donde se van a observar las condiciones a las que se somete el tubo del receptor.

En la Figura 24 se puede ver un ejemplo de cómo queda un mallado genérico para realizar un análisis de este problema. En este se puede observar lo comentado en el párrafo anterior, la malla es gradual, siendo más fina cuanto más se acerca a la zona más cercana al tubo.

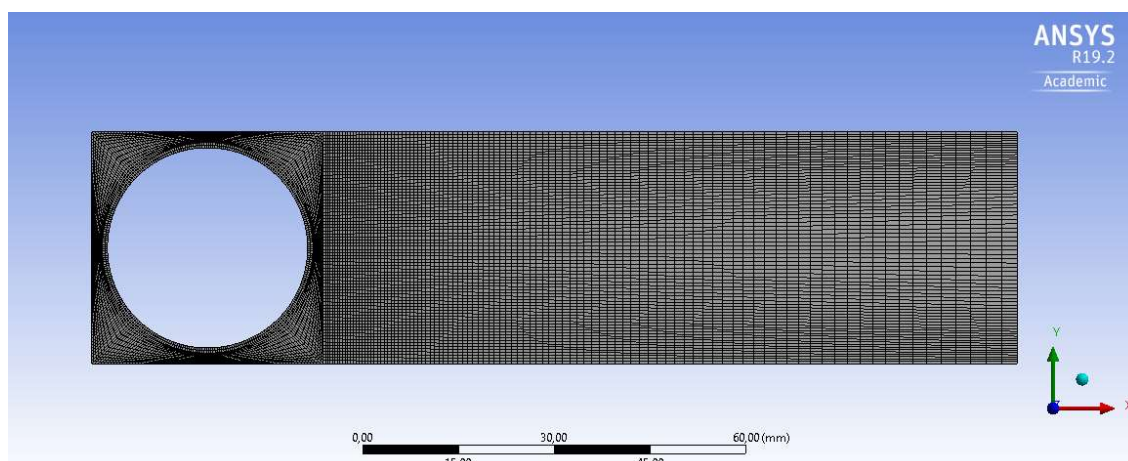


Figura 24: Ejemplo de mallado de la geometría

Para comprobar que este mallado es correcto, se realizará un análisis de sensibilidad de malla. Para ello, además de la malla que se ha creado para realizar las simulaciones, a la que llamaremos mallado normal, se ha creado otra malla mucho más fina con un mayor número de divisiones, lo que la hará más precisa. Como inconveniente, las simulaciones realizadas con el mallado fino son más largas, ya que se deben analizar muchos más elementos en la simulación CFD. En la Tabla 2 se puede ver una comparación entre estos dos tipos de mallas.

	Mallado normal	Mallado fino
Nodos	16300	96750
Elementos	15840	95500
Tiempo de simulación aproximado (s)	260	900

Tabla 2: Comparación entre mallado normal y mallado fino

Tras esto, se realizará el análisis y post-procesado para un mismo caso utilizando las dos mallas diferentes. Como resultado, se puede ver en la Figura 25 que los resultados finales utilizando ambos tipos de malla dan los mismos valores, con la diferencia de que en el mallado más fino se muestran más puntos del dominio que con el mallado normal. Por tanto, la malla que se ha utilizado para realizar las simulaciones CFD tiene un tamaño correcto.

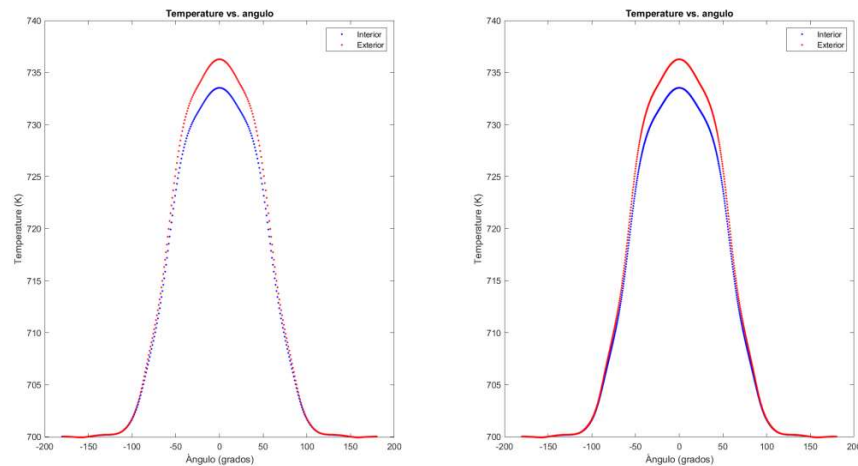


Figura 25: Comparación de resultados entre mallado normal y mallado fino

Además de la creación de la malla, en este módulo también se crearán divisiones dentro de la geometría que se pueden apreciar en la Figura 26. Estas divisiones se conocen en el programa con el nombre de **Named Sections** y sirven para poder aplicar las diferentes condiciones de contorno en la simulación. En la siguiente Ilustración se pueden ver las diferentes zonas lineales a las que aplicaremos estas condiciones. Además de estas, se marcarán las superficies ocupadas por el tubo y por el fluido, de esta manera, se podrán seleccionar tanto el material del que se compone el tubo y sus propiedades como las propiedades del fluido que rodea al tubo, que en el caso de este problema será el aire que rodea al receptor de la torre.

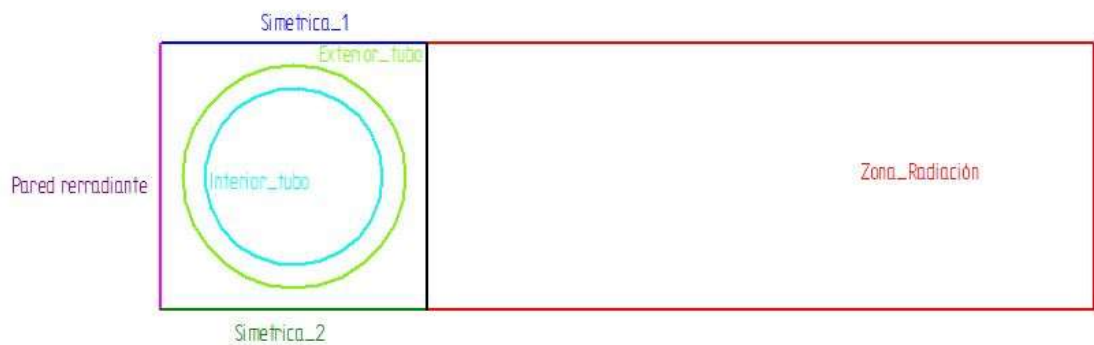


Figura 26: Zonas en las que se divide la geometría

3.2 Simulación CFD

En este apartado se va a explicar cómo se han realizado las simulaciones de análisis de fluidos computacional (CFD) a través de **ANSYS Fluent**. Para ello en **Workbench** se seleccionará el módulo **Setup**, que abrirá Fluent.

Para trabajar en este módulo, se deben introducir las condiciones generales del problema y los diferentes modelos de trabajo con los que se va a realizar la simulación. Tras esto, se podrán editar los materiales de las diferentes zonas que se desean analizar. De esta manera, se podrán introducir las diferentes condiciones de contorno, que serán las condiciones a las que el receptor se somete durante su proceso de trabajo.

Una vez se han fijado las condiciones de contorno, se podrá correr la simulación. En este punto, el programa realizará una serie de cálculos iterativos para obtener la solución. Una vez la simulación es realizada, en la pestaña **Results** se podrá elegir la forma en la que queremos ver los resultados obtenidos en la simulación.

3.2.1 Análisis de la geometría

Para poder realizar la simulación primero se deben establecer unas condiciones de contorno, esto se realizará desde el módulo **Setup** de Fluent.

Dentro del módulo **Setup**, en primer lugar se encuentra **General**, módulo en el cual se introducen las condiciones generales del problema. Para la resolución de este problema, el tipo de simulación estará basada en presiones, esto significa que utilizará el algoritmo de las ecuaciones de Navier-Stokes basado en presiones para calcular la solución [39], con un tiempo estático y velocidad absoluta. Además de eso, la simulación se realiza en un espacio planar de 2D.

Posteriormente en el módulo **Models** habrá que elegir el método de resolución del problema, y dependerá de las características de este. En el caso de este proyecto, habrá que activar la ecuación de la energía, establecer un modelo de viscosidad $k - \xi$ y elegir un modelo de radiación de Discrete Ordinates (DO).

A continuación, en el módulo **Materials** se procederá a la selección de los materiales. Para ello es importante haber seleccionado en el módulo del mallado las superficies que ocupan tanto el fluido exterior como el tubo.

Como fluido exterior se seleccionará el aire para todas las simulaciones ya que es el fluido que se encuentra en la parte del receptor que rodea al tubo.

En cambio, para el tubo se seleccionarán diferentes materiales en diferentes simulaciones para ver cómo varían los resultados en función de los materiales que se utilizan para el tubo. Las propiedades de estos materiales [36] [37] se pueden ver a continuación en la Tabla 3:

	Inconel alloy 625	Incolloy 800H
$\rho \left(\frac{Kg}{m^3} \right)$	8840	7940
$C_p \left(\frac{J}{Kg.K} \right)$	410	460
Thermal conductivity $\left(\frac{W}{m.K} \right)$	17.5	24.7

Tabla 3: Propiedades materiales del tubo

Esto servirá para el siguiente módulo, **Cell Zone Conditions**, en el que se seleccionará específicamente cuál será el material del tubo y cuál será el material del fluido externo.

Las condiciones que se van a emplear se seleccionan en el módulo **Boundary Conditions**, en él se seleccionarán las diferentes condiciones a las que están sometidas las diferentes secciones que se nombraron tras realizar el mallado que se pueden ver en la Figura 26. Las condiciones generales que se van a emplear son:

- **Pared rerradiante:** Esta sección será de tipo Wall. Además, se seleccionará que el valor del flujo de calor en esta zona es igual a 0 ya que es un cuerpo gris. Por último, esta pared estará recubierta por Pyromark 2500, un tipo de pintura utilizada para incrementar el valor de la emisividad interna del receptor. Teniendo un valor de Internal emissivity de 0.87 [40].
- **Paredes simetría:** Las paredes de simetría (periodic_1 y periodic_2) se deben transformar en una única, ya que ambas paredes tienen la misma distribución de nodos [39]. Para ello hay que utilizar los comandos mesh > modify-zones > make periodic. Tras escribir los comandos se introducen en la consola los números que representan a cada una de las 2 zonas. Por último, habrá que poner como condición que sea traslacional. De esta manera las 2 zonas se unen en una sola y la sección será de tipo periodic.
- **Pared radiación:** Esta es la zona de la geometría por la que incide la radiación solar concentrada que proviene del campo de heliostatos y tendrá por tanto una condición de tipo pressure-inlet. Además de esto, debido a las condiciones del receptor, en el módulo Radiation se seleccionará la condición de cuerpo negro y se establecerá una temperatura de cuerpo negro para que de este modo se llegue a la radiación a la que se desea a través de la ecuación que se presenta a continuación (3.1).

$$q_{rad}'' = \sigma \cdot \xi \cdot T^4 \quad (3.1)$$

- **Pared interior del tubo:** Esta zona será de tipo Wall y como condiciones térmicas se utilizará calor por convección, por lo que se utilizará la opción Convection. Aquí habrá que establecer la temperatura media del fluido y el coeficiente de transferencia de calor U, calculada a partir de la ecuación (3.2)

$$U_{tot} = \frac{1}{\pi \cdot D_i \cdot L \cdot \left[\frac{1}{h \cdot L \cdot \pi \cdot D_i} + \frac{R_{ens}}{L \cdot \pi \cdot D_i} \right]} \quad (3.2)$$

Para poder calcular esta ecuación, se necesitan conocer los valores de la resistencia de convección del fluido y la resistencia de ensuciamiento del tubo.

Para obtener el valor de la resistencia de convección del fluido se necesita el coeficiente de convección h , obteniéndose con el uso de las correlaciones que aparecen a continuación (3.3) [41], estos valores dependen del tipo de fluido y de su velocidad, por lo que cambiarán si se modifica el gasto másico del fluido o si se utiliza un fluido diferente.

$$Nu_d = \frac{h \cdot D_i}{k} = 0.023 \cdot Re^{0.8} \cdot Pr^{0.4} \quad (3.3)$$

El coeficiente de convección h se obtiene de esta correlación, pero previamente se necesitan conocer los valores de los números de Reynolds y Prandtl, que se obtienen a partir de las ecuaciones 3.4 y 3.5 respectivamente.

$$Pr = \frac{\mu_{fluido}(\bar{T}) \cdot Cp_{fluido}(\bar{T})}{k_{fluido}(\bar{T})} \quad (3.4)$$

$$Re = \frac{\rho_{fluido}(\bar{T}) \cdot D_i \cdot V_{fluido}}{\mu_{fluido}(\bar{T})} \quad (3.5)$$

Para calcular el valor de Re se necesita conocer la velocidad del fluido, que se obtiene despejándola de la ecuación 3.6 a partir del valor del flujo másico que se tiene en el tubo

$$\dot{m}_{tubo} = \rho_{fluido}(\bar{T}) \cdot \frac{\pi}{4} \cdot D_i^2 \cdot V_{fluido} \quad (3.6)$$

Por otra parte, el valor de la resistencia de ensuciamiento del tubo se obtendrá a partir de la referencia [25] ya que es un caso similar.

$$R_{ens} = 8,8 \cdot 10^{-5} \left(\frac{m^2 \cdot K}{W} \right)$$

Tras la selección de las condiciones de contorno que se utilizarán para el caso concreto que se esté analizando se procederá a seleccionar en el módulo **Reference Values** el área desde la que se empezará a realizar los cálculos, en el caso de este problema se seleccionará la zona de radiación ya que es la zona del receptor por la que llega la radiación concentrada proveniente del campo solar.

Una vez se ha seleccionado todo lo anterior se dispondrá de todos los datos y la simulación estará lista para realizarse, para ello, a partir del módulo **Solution** se hará que se inicialicen los valores. Una vez se ha realizado estaremos listos para correr la simulación en la pestaña **Run Calculation**, en la que se elegirá el número de iteraciones que se desean realizar para obtener la solución.

Una vez se han hecho los cálculos podremos ver los diferentes resultados obtenidos en el módulo **Results**, de aquí se obtienen los contornos que representan los valores existentes en la

geometría. Aquí se seleccionarán los datos que interesen para la realización del problema para poder hacer un primer análisis. En el caso del estudio de la separación de tubos, los valores que más interesan para poder obtener una solución son los valores de temperatura, radiación incidente y flujo de calor, los cuales se muestran a continuación en la Figura 27, en la Figura 28 y en la Figura 29

En el caso de la temperatura se puede ver que se mantiene baja en la zona cercana a la entrada de radiación, pero va aumentando obteniéndose la temperatura más elevada en la pared del tubo en la que incide la radiación directamente. Posteriormente, esta se va reduciendo según se acerca a la parte trasera del tubo.

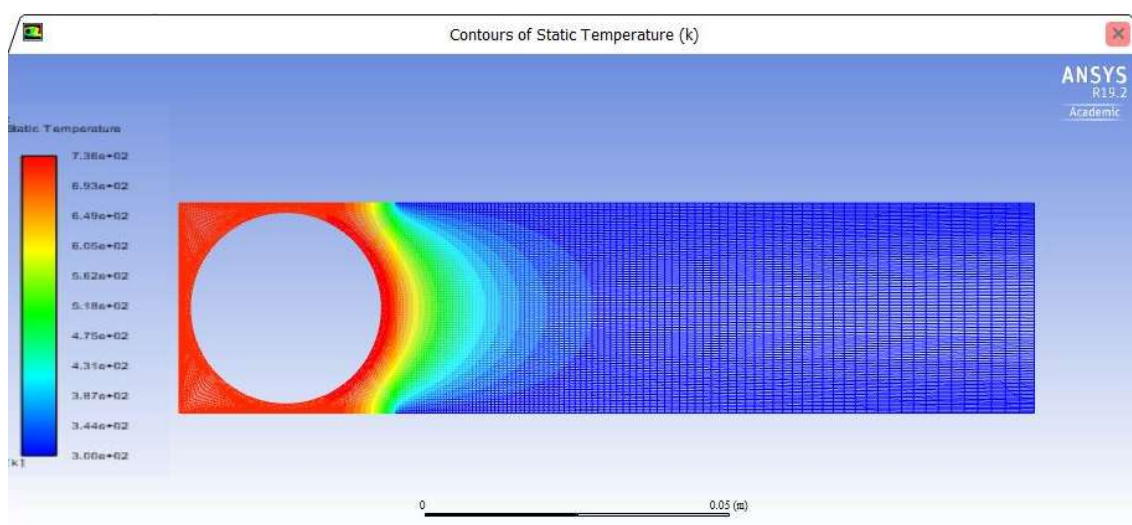


Figura 27: Contorno de temperaturas en la geometría del receptor

En cuanto a la radiación incidente se puede apreciar claramente que es mayor en la zona del tubo en la que incide directamente. En la zona trasera del tubo se puede observar que la radiación es mucho más pequeña.

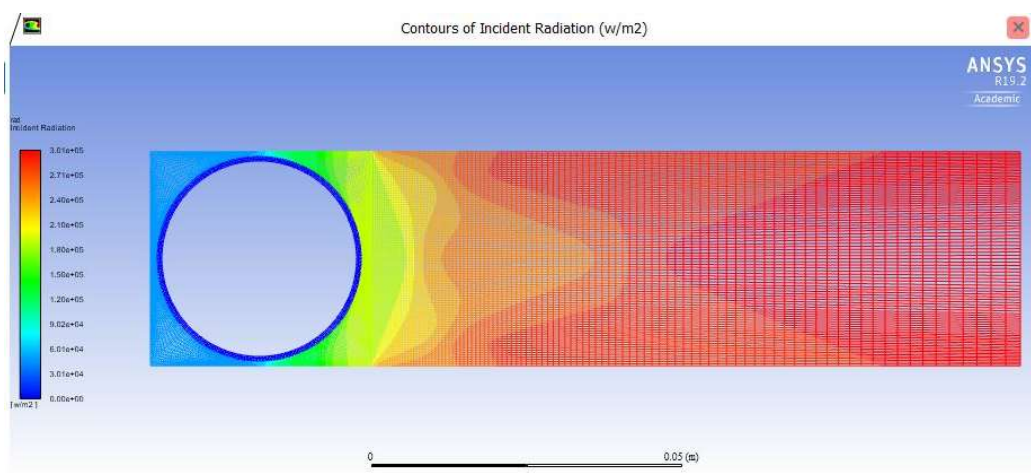


Figura 28: Contorno de radiación incidente en la geometría del receptor

En cuanto al flujo de calor, se puede apreciar que la parte delantera del tubo es la que tiene un valor mayor debido a que es aquí donde incide la radiación concentrada directamente y se

produce un mayor intercambio de calor. Este valor va disminuyendo cuando la radiación incide con un cierto ángulo (A mayor ángulo menor flujo de calor).

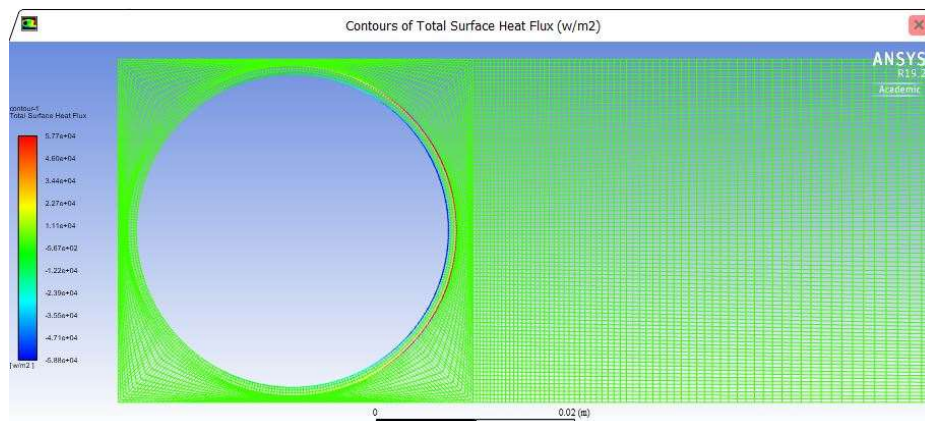


Figura 29: Contorno de flujo de calor en la geometría del receptor

Por último, los datos obtenidos en cada una de las simulaciones deben exportarse en un archivo ASCII para poder realizar el post-procesado en MATLAB, donde se obtendrán los resultados de las simulaciones.

3.2.2 Post-procesado de datos

Tras realizar las simulaciones en ANSYS los datos obtenidos de estas deben exportarse a MATLAB para poder interpretar de forma correcta los resultados.

Para ello, en primer lugar se cargarán los ficheros ASCII que se obtuvieron previamente en Fluent. Tras cargar los datos, estos se deben filtrar, ya que la zona en la que nos interesa conocer los valores de los datos con precisión es la zona del tubo. Con el objetivo de que este paso sea más sencillo se ha establecido el origen de coordenadas en el centro del tubo, así se podrá realizar una conversión de coordenadas cartesianas a cilíndricas, pudiendo filtrar los datos que nos interesan para el problema en función del radio.

Tras realizar este filtro, se procede a realizar gráficos para la obtención de soluciones del problema. A partir de estos se podrá ver los valores de los parámetros de temperatura, radiación incidente y flujo de calor que inciden en las superficies interior y exterior de los tubos, de esta manera podremos conocer las condiciones a las que se somete el tubo.

4 Resultados

En este apartado se comentarán y explicarán los resultados obtenidos a través de las simulaciones realizadas.

En primer lugar se va a realizar un post-procesado con cada geometría que se va a analizar, de esta manera podremos ver cómo varían los diferentes parámetros en función de la separación de los tubos, de esta manera se obtendrá la geometría óptima de separación de tubos. Posteriormente, se van a variar una serie de parámetros como el material de tubo o la temperatura del fluido que circula por el interior del tubo, de esta manera podremos tener un análisis más amplio del problema.

4.1 Caso nominal

El problema que se va a analizar es un caso nominal, por tanto, se deben establecer todos los parámetros previos antes de realizar una simulación.

Para ello previamente hay que establecer las condiciones del fluido que circula por el interior del tubo. Uno de los fluidos más utilizados en las centrales termosolares de tipo torre es la comúnmente denominada “sal solar”, que es una mezcla de sales fundidas que se utiliza como fluido en centrales solares térmicas. En la Tabla 4 se pueden ver las propiedades de este fluido [42].

C_p [$\frac{J}{kg \cdot K}$]	$1396,044 + 0,172 \cdot T$
μ [Pa/s]	$0.075439 - 2,77 \cdot 10^{-4} \cdot (T - 273) + 3,49 \cdot 10^{-7} \cdot (T - 273)^2 - 1,474 \cdot 10^{-10} \cdot (T - 273)^3$
ρ [kg/m ³]	$2263,628 - 0,636 \cdot T$
k [W/m·K]	0,45

Tabla 4: Propiedades de la sal solar

Tras establecer el material se deben realizar los cálculos a través de las ecuaciones vistas en el capítulo 3.2.1 para así obtener U_{tot} , parámetro que se introducirá en Fluent.

Además del fluido también hay que seleccionar el material del tubo, en el caso de un primer análisis se utilizará en Inconel alloy 625, cuyas propiedades se encuentran en la Tabla 3.

Por último, para este caso se ha de seleccionar una geometría del receptor para así poder conocer los valores de los parámetros de interés en este problema (Temperatura, radiación incidente y flujo de calor) en función del ángulo tanto en su cara exterior como en su cara interior. Para la geometría de este caso nominal se han utilizado unos valores de $s_l = 5\%$ y $s_t = 5\%$, ya que son unos valores medios típicos de la separación de tubos que se emplean en centrales termosolares de tipo torre existentes tales como las plantas de Crescent Dunes o Gemasolar [25].

A continuación en la Figura 30 se muestran las gráficas de los distintos parámetros estudiados para el caso nominal que se ha presentado.

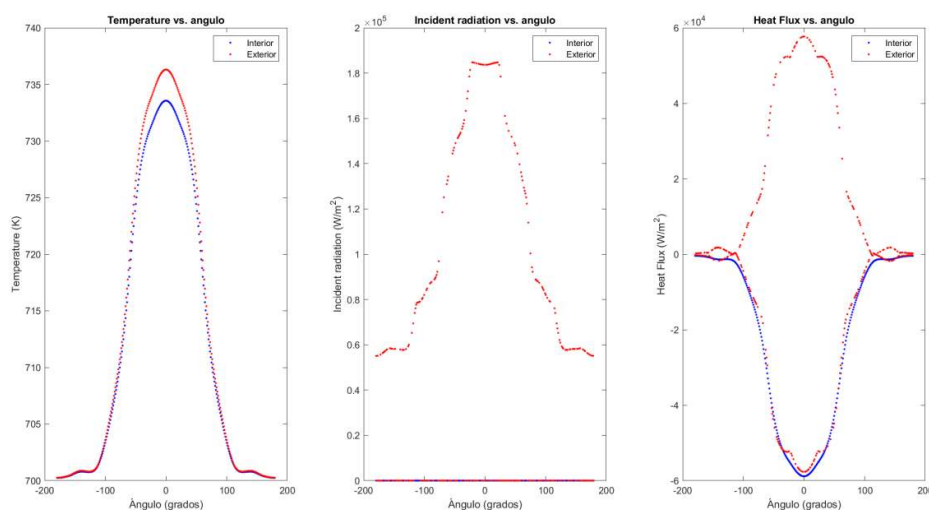


Figura 30: Gráficas de temperatura, radiación incidente y flujo de calor para una geometría de SI=5% y St=5%

4.2 Variación de la geometría

A partir de entonces se podrá realizar un barrido paramétrico por el que se obtendrán una serie de resultados en función de la geometría que se le haya dado a la separación de estos tubos. Estas separaciones pueden verse en la Tabla 1. De esta manera se puede observar de qué manera influyen tanto la separación lateral entre tubos como la separación entre la parte trasera de los tubos con la pared rerradiante en los parámetros de interés (temperatura, radiación incidente y flujo de calor) del análisis que se está realizando.

4.2.1 Efecto de la separación lateral

Para ver de qué manera afecta la separación lateral entre los tubos, se realizará en primer lugar un análisis en el que se mantendrá fija la separación trasera variando únicamente los valores de la separación lateral.

Tal y como se puede ver en la Figura 31, la temperatura en la parte frontal se mantiene igual, sin importar cuanta separación haya entre los tubos del receptor, sin embargo, en la parte trasera del tubo sí que se producen variaciones en la temperatura cuando aumenta esta distancia, ya que aquí, la temperatura es más alta cuando la distancia entre los tubos es mayor. De esta manera, cuanto más aumente la distancia lateral entre tubos, el gradiente de temperaturas en la superficie del tubo será menor, reduciendo de esta manera las tensiones a las que este se somete.

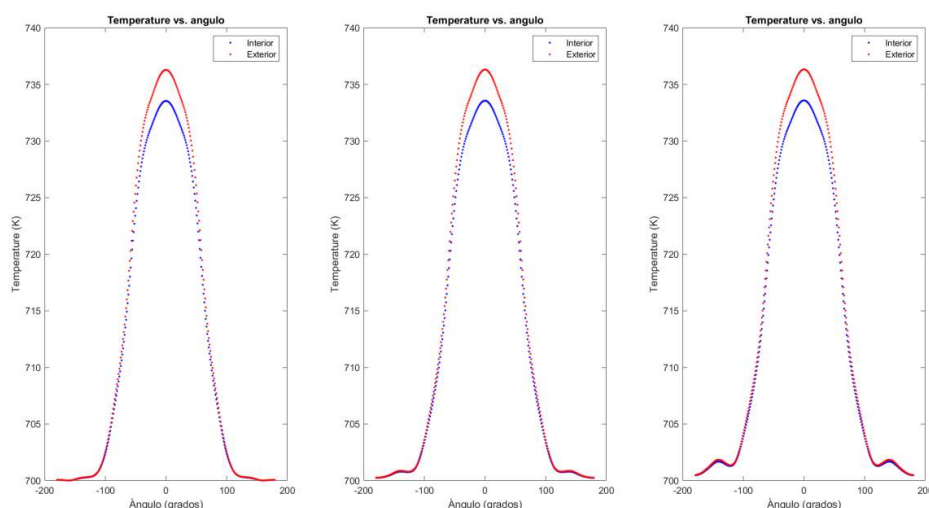


Figura 31: Gráficas de temperatura para una geometría con una distancia $St=5\%$ fija, variando SI con unos valores de 3%, 5% y 7%

En cuanto a la radiación que incide sobre la superficie del tubo, es similar en todas las geometrías analizadas de 0° a 90° , sin embargo, en la parte posterior el tubo, la radiación incidente aumenta de manera considerable cuanto más separados estén los tubos entre sí. Esto se puede apreciar a continuación en la Figura 32.

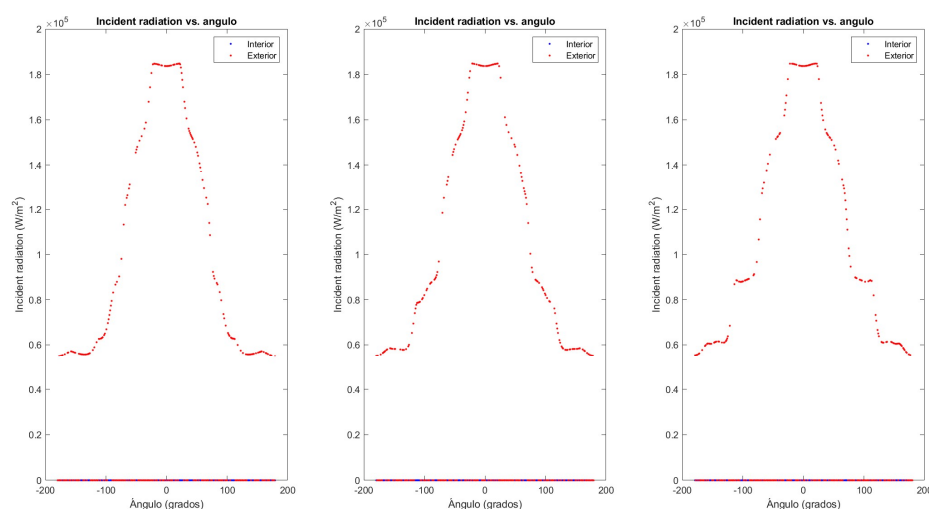


Figura 32: Gráficas de radiación incidente para una geometría con una distancia $St=5\%$ fija, variando SI con unos valores de 3%, 5% y 7%

Por último, en la Figura 33 se muestra el caso del flujo de calor. De esta figura se puede ver que este se mantiene con pocas variaciones aunque se modifique la distancia entre tubos en la parte delantera del tubo, pero en la parte posterior, el flujo de calor absorbido por la parte exterior del tubo aumenta ligeramente cuanto más separados se encuentran los tubos. Además de esto, se puede observar que en la parte interior del tubo el calor que se cede aumenta ligeramente cuanto más se aumenta la separación lateral entre los tubos del receptor.

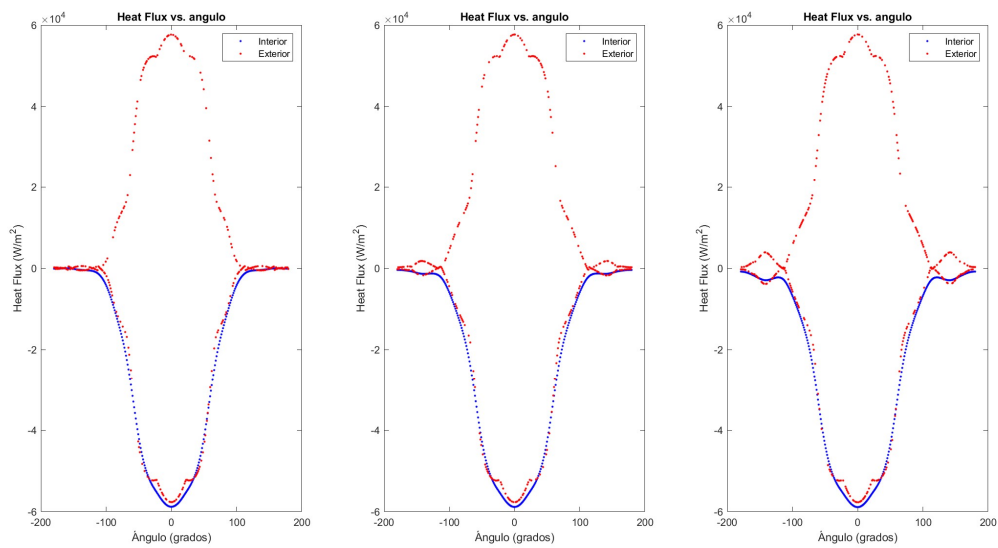


Figura 33: Gráficas de flujo de calor para una geometría con una distancia $St=5\%$ fija, variando SI con unos valores de 3%, 5% y 7%

4.2.2 Efecto de la separación lateral

Además del estudio de la variación de la distancia lateral entre tubos, también se realizará un estudio sobre cómo afecta la variación de la distancia trasera a los diferentes parámetros que se estudian en este problema. Para ello se realizará un barrido paramétrico manteniendo un valor de distancia lateral entre tubos fijo y variando la distancia que hay entre la parte trasera del tubo y la pared rerradiante.

En primer lugar, se puede observar que cuando la distancia lateral entre tubos es pequeña, la variación de la distancia entre el tubo y la pared trasera del receptor apenas afecta al valor de la temperatura, ya que, como se puede ver en la Figura 34, para un mismo valor de una distancia lateral (3% del diámetro exterior), se ha variado la distancia entre el tubo y la pared trasera del receptor pero en la gráfica apenas se observan cambios.

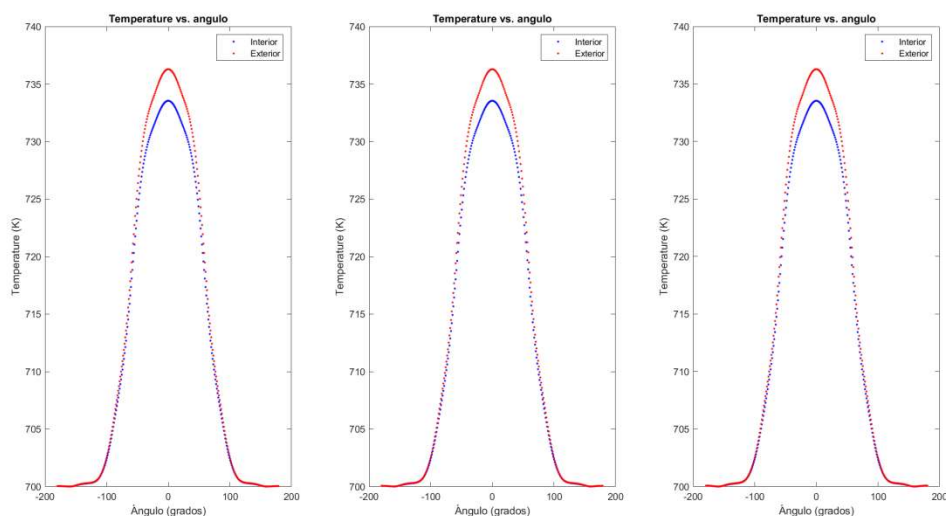


Figura 34: Gráficas de temperatura para una geometría con una distancia $SI=3\%$ fija, variando St con unos valores de 3%, 5% y 7%

Sin embargo, cuando la distancia lateral entre tubos es grande (7% del diámetro exterior del tubo), en la Figura 35, la temperatura en la parte trasera del tubo es mayor cuando se aumenta la distancia trasera, sin embargo, este aumento de temperatura es muy ligero.

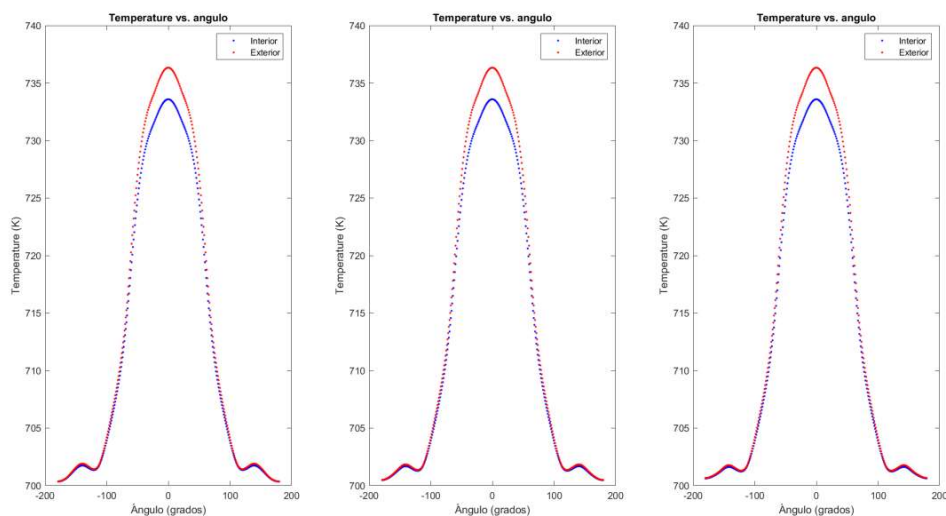


Figura 35: Gráficas de temperatura para una geometría con una distancia $SI=7\%$ fija, variando St con unos valores de 3%, 5% y 7%

Al igual que ocurre en el caso de la temperatura, el valor de la distancia trasera apenas afecta al nivel de radiación que incide en la superficie del tubo, siendo la radiación incidente ligeramente mayor en la parte trasera del tubo cuando la distancia lateral es grande (Figura 36), sin embargo, cuando la distancia lateral es pequeña, los valores de la radiación incidente apenas varían cuando se modifica la distancia trasera (Figura 37).

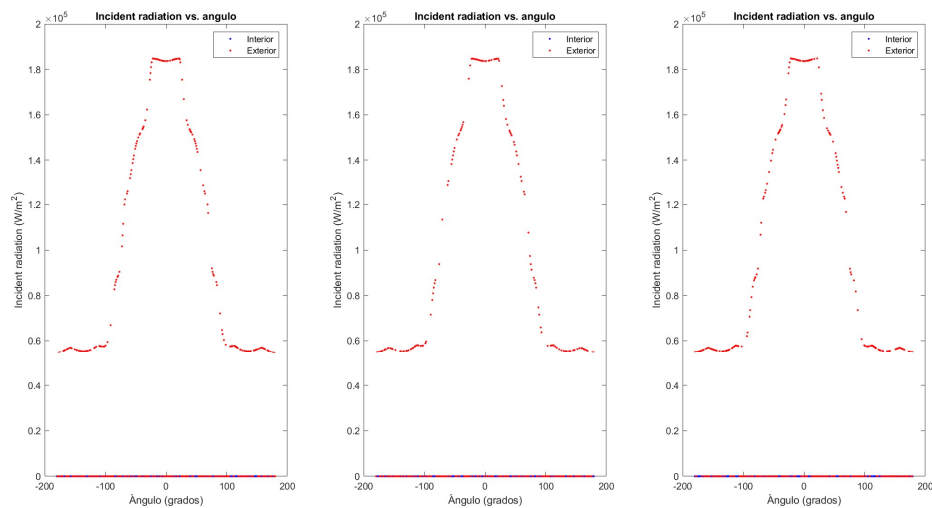


Figura 36: Gráficas de radiación incidente para una geometría con una distancia $Sl=3\%$ fija, variando St con unos valores de 3%, 5% y 7%

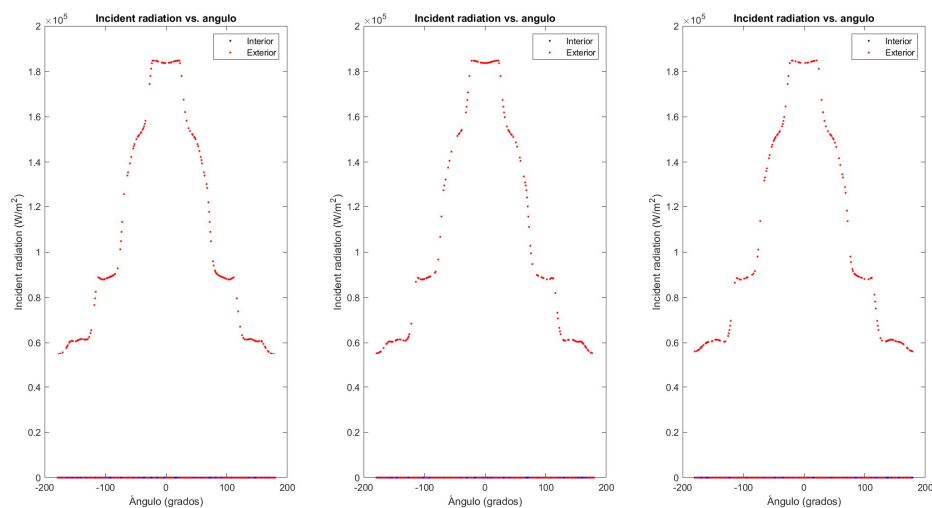


Figura 37: Gráficas de radiación incidente para una geometría con una distancia $Sl=7\%$ fija, variando St con unos valores de 3%, 5% y 7%

Por último, del análisis del flujo de calor obtenemos las mismas conclusiones que en el análisis de los dos parámetros anteriores. En la Figura 38 se puede ver que el valor del flujo de calor apenas varía al modificar la distancia trasera si la distancia lateral entre tubos es pequeña. En el caso de que esta distancia sea grande, se puede ver a partir de los datos que se muestran en la Figura 39 que el valor del flujo de calor varía mínimamente en la zona trasera del tubo, aumentando cuando esta distancia aumenta.

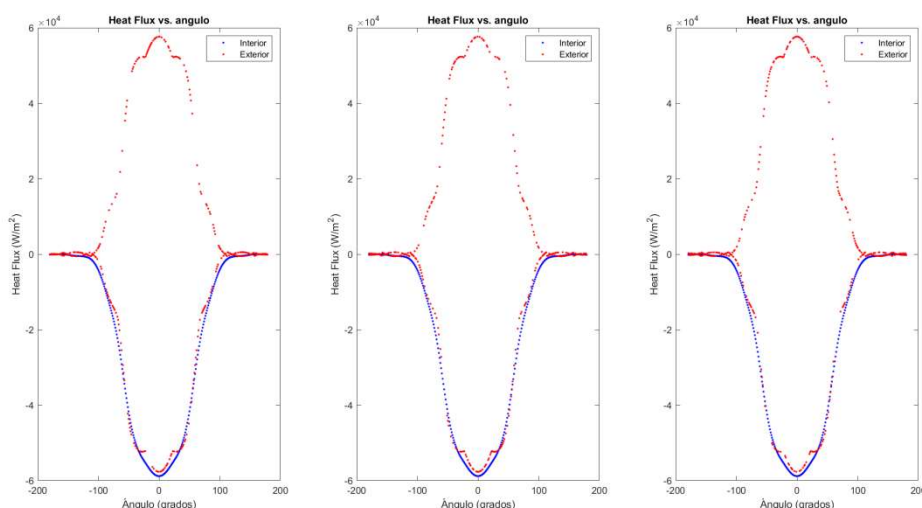


Figura 38: Gráficas del flujo de calor para una geometría con una distancia $Sl=3\%$ fija, variando St con unos valores de 3%, 5% y 7%

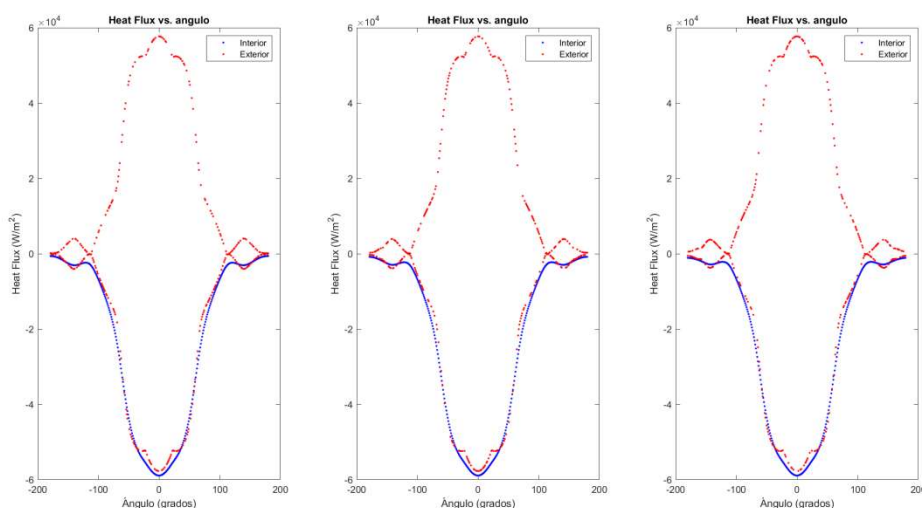


Figura 39: Gráficas del flujo de calor para una geometría con una distancia $Sl=7\%$ fija, variando St con unos valores de 3%, 5% y 7%

Por tanto, de este análisis se puede sacar como conclusiones que el valor de la distancia lateral entre tubos cobra más importancia que el valor de la distancia del tubo con la pared trasera del receptor, ya que, para todos los parámetros analizados, esta distancia apenas tiene efecto sobre ellos.

Esto se puede apreciar a continuación en la Figura 40, la cual muestra la variación de temperaturas en cuatro puntos de la superficie del tubo ($\Theta = 0^\circ, +90^\circ, -90^\circ$ y 180°) frente a la variación de la distancia lateral. Además de esto, en la gráfica también se muestran los valores de esta temperatura en función de la distancia trasera para cada uno de los valores de la distancia lateral entre tubos.

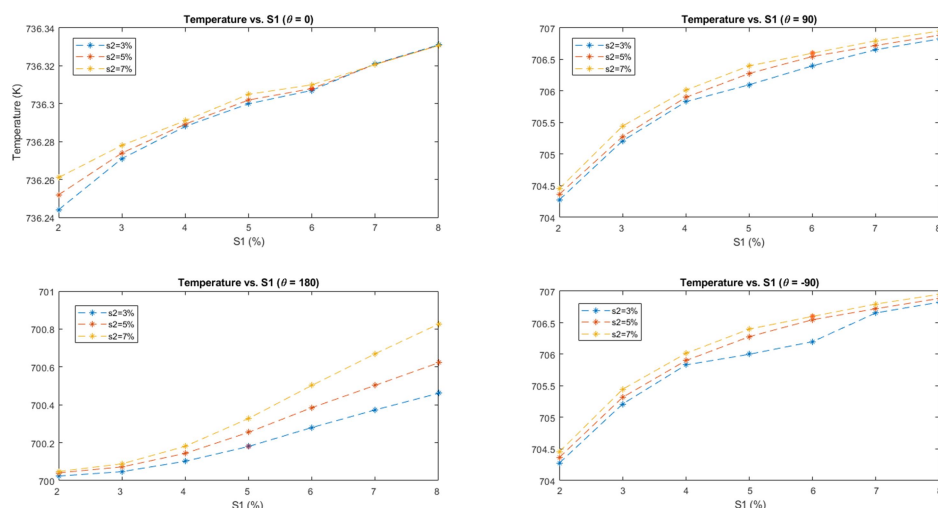


Figura 40: Variación de temperatura según el ángulo para diferentes geometrías distintas con una temperatura de fluido de trabajo de 700K

Además, se puede observar que cuanto más grande sea la distancia lateral, los gradientes de temperatura, radiación incidente y flujo de calor son más pequeños, ya que, aunque los valores de estos parámetros se mantienen constantes en la cara frontal del tubo, en la cara posterior estos valores aumentan ligeramente. De esta manera se reducen las posibilidades de rotura de los tubos del receptor, sin embargo, si el aumento de esta distancia es demasiado grande, las pérdidas que se producen en el receptor aumentarán. Además, si la distancia lateral es demasiado grande, el número de tubos por panel que se sitúan en el receptor será menor para un mismo tamaño de receptor, por lo que no se debe establecer una distancia demasiado grande para la separación lateral entre tubos, ya que el rendimiento de la central bajaría.

4.3 Variación del material

Posteriormente, se va a analizar cómo afecta al problema el uso de otros materiales del tubo. Para ello, en lugar de Inconel alloy 625, se realizarán simulaciones con Inconel 800H, cuyas propiedades se encuentran en la Tabla 3 de este trabajo (Capítulo 3.2.1).

En la Figura 41 se muestra una gráfica comparativa relativa al uso de los dos tipos de materiales. Se puede observar que la temperatura máxima que se alcanza con el uso de Incoloy 800H (izquierda) es ligeramente menor que la que se obtiene si el material del tubo utilizado es el Inconel alloy 625 (derecha), a lo que se suma que las temperaturas de la zona posterior del tubo son ligeramente superiores en el Incoloy 800H, por lo que el gradiente de temperaturas del tubo será menor con el uso de Incoloy 800H. Además de esto, la diferencia de temperaturas entre el diámetro exterior e interior del tubo en la parte frontal del tubo es menor, lo que hace que se reduzcan posibles tensiones internas en el material que pueden provocar problemas a lo largo del tiempo.

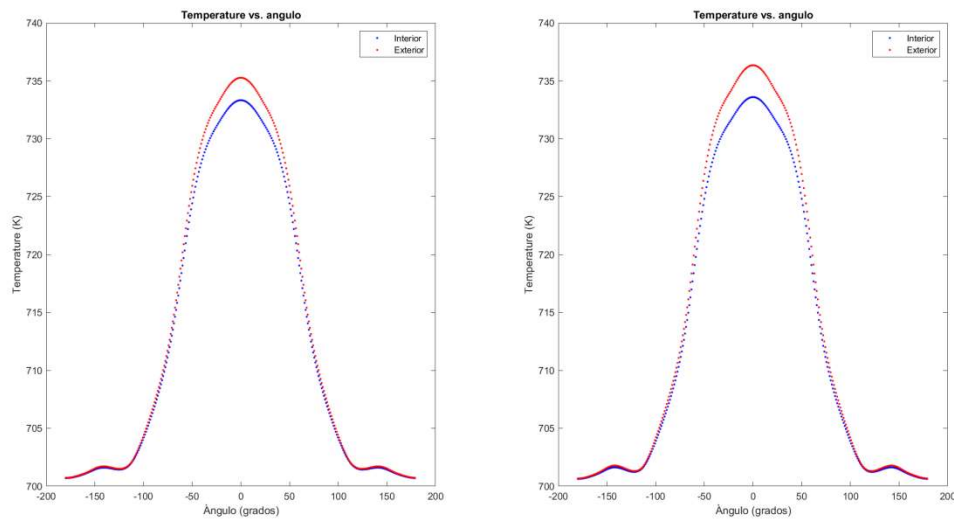


Figura 41: Gradiente de temperaturas para $Sl=St=7\%$ con Incoloy 800H (izquierda) y con Inconel alloy 625 (derecha)

Por otro lado, el uso de un material u otro no tiene efecto en lo que a la radiación incidente se refiere, ya que para este parámetro, los resultados que se pueden observar en la Figura 42, son iguales para ambos materiales.

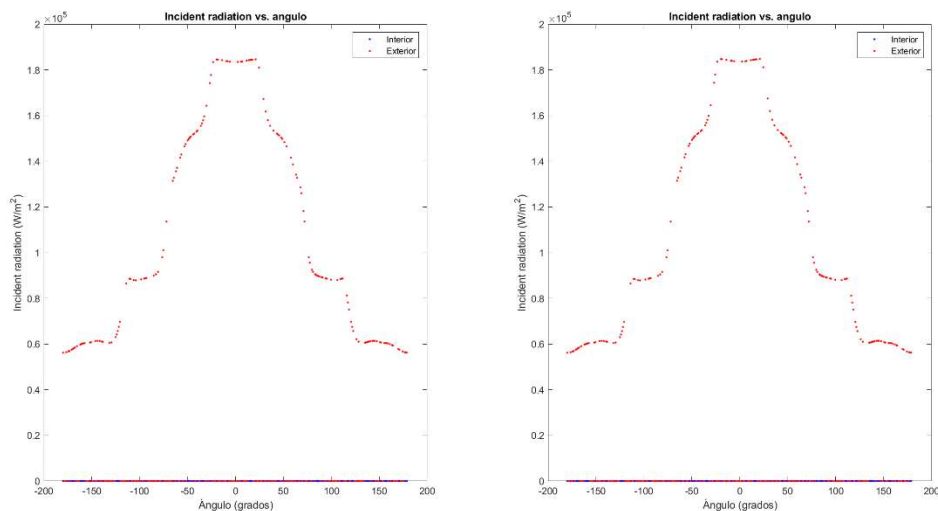


Figura 42: Radiación incidente para $Sl=St=7\%$ con Incoloy 800H (izquierda) y con Inconel alloy 625 (derecha)

En las gráficas correspondientes al flujo de calor de la Figura 43, se puede ver que en el exterior del tubo el flujo de calor en el Inconel alloy 625 es ligeramente superior. Con respecto al interior del tubo, existen diferencias con respecto a los dos materiales, ya que, en la zona delantera del tubo, el Inconel alloy 625 cede más calor, sin embargo, en la zona trasera del tubo, el material que cede más calor es el Incoloy 800H.

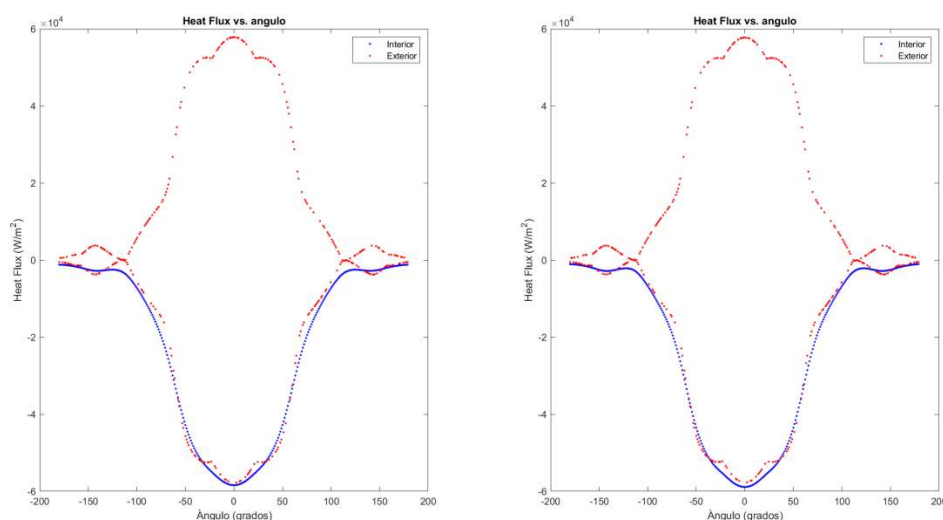


Figura 43: Flujo de calor para $Si=St=7\%$ con Incoloy 800H (izquierda) y con Inconel alloy 625 (derecha)

De estas gráficas se puede sacar la conclusión de que el Incoloy 800H será un material más estable para su uso en los tubos del receptor de una central termosolar de torre, ya que el gradiente de temperaturas que se produce en este tipo de tubos es menor. Sin embargo, su precio es superior al del Inconel alloy 625, por lo que los costes de la central aumentarían.

A partir de estos resultados se obtienen las siguientes conclusiones, en primer lugar, se puede observar que el gradiente de temperaturas es ligeramente menor cuando los tubos están más separados. También se puede observar que el gradiente de temperaturas es ligeramente menor cuando el material utilizado es el Incoloy 800H ya que su temperatura máxima es menor que la que se obtiene utilizando Inconel alloy 625, y en la cara posterior la temperatura con el uso de Incoloy 800H es ligeramente mayor.

4.4 Variación de la temperatura del fluido de trabajo

La temperatura media del fluido de trabajo que circula por el interior de los tubos del receptor es otro valor a tener en cuenta. Para analizar de qué manera afecta este cambio de temperaturas es necesario volver a calcular las características del fluido que, en el caso de este problema, es la sal solar. Estas características se pueden encontrar en la Tabla 4 del capítulo 3.3. Además de ello, también será necesario recalcular las ecuaciones que se encuentran en el capítulo 3.2.1 ya que, al variar la temperatura del fluido de trabajo y por tanto, las características del fluido, el valor del coeficiente de transferencia de calor U_{tot} cambiará. Los valores de U_{tot} en función de la temperatura media del fluido de trabajo se muestran a continuación en la Tabla 5.

	T= 700 K	T= 750 K	T= 800K
$U_{tot} \left[\frac{W}{m^2 \cdot K} \right]$	1753,33	1935,29	2139,67

Tabla 5: Valores de U_{tot} en función de la temperatura media del fluido de trabajo

En primer lugar, en la Figura 44 se observa que las temperaturas de las superficies interior y exterior del tubo son más altas cuanto más alta sea la temperatura del fluido que pasa por el interior ellos. Además de esto, se puede ver que el gradiente de temperaturas entre la parte delantera y trasera del tubo es inferior cuanta más alta sea la temperatura del fluido.

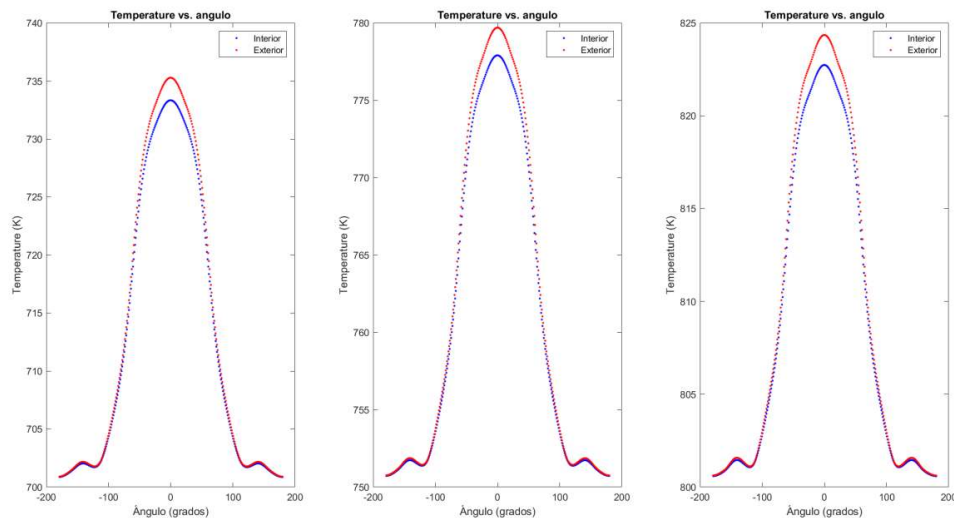


Figura 44: Temperatura de los tubos del receptor para $Sl=8\%$ y $St=7\%$ aplicando variaciones de temperatura en el fluido de trabajo, 700K (izquierda), 750K (centro) y 800K (derecha)

Analizando los valores de la radiación incidente de la Figura 45, se puede ver con claridad que el nivel de radiación aumenta cuando la temperatura del fluido es mayor. Esto se debe a que, para obtener temperaturas más altas en el fluido, este se debe calentar más. Al encontrarnos en el caso de una central cuya fuente de energía es la radiación solar, la temperatura de los tubos del receptor deberá ser mayor cuanta más alta sea la radiación que incide en estos.

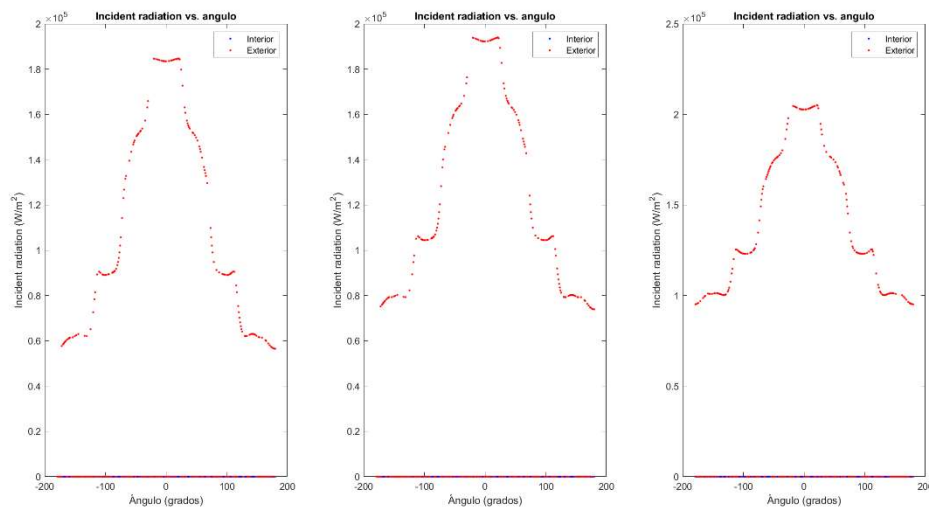


Figura 45: Radiación incidente en los tubos del receptor para $Sl=8\%$ y $St=7\%$ aplicando variaciones de temperatura en el fluido de trabajo, 700K (izquierda), 750K (centro) y 800K (derecha)

En cuanto a los valores que se obtienen de flujo de calor que se pueden ver en la Figura 46, se puede ver que son más pequeños cuando la temperatura del fluido de trabajo aumenta, esto se debe a que la diferencia de temperaturas entre el fluido de trabajo y la temperatura exterior producida por la radiación solar concentrada es menor, por tanto, la cantidad de calor que se intercambia en el tubo es menor.

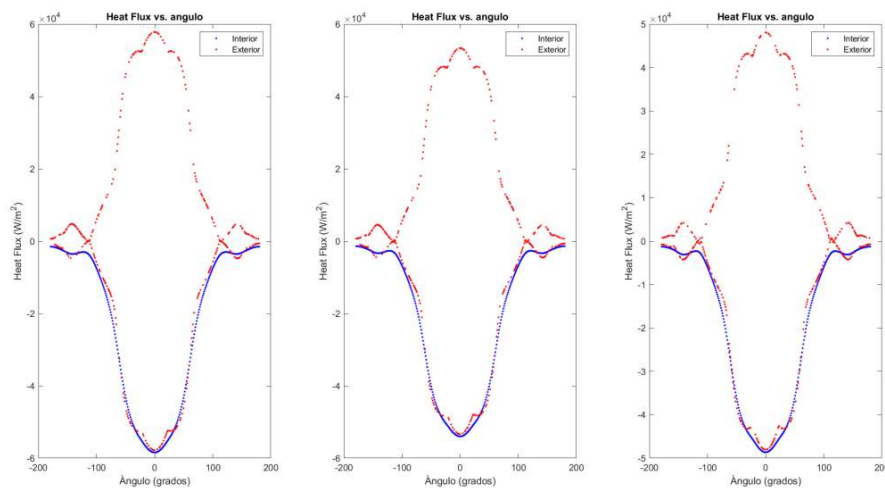


Figura 46: Flujo de calor en los tubos del receptor para $Sl=8\%$ y $St=7\%$ aplicando variaciones de temperatura en el fluido de trabajo, 700K (izquierda), 750K (centro) y 800K (derecha)

Por tanto, de este análisis se puede sacar la conclusión de que la temperatura del fluido debe de ser lo más alta posible, no solo para que el rendimiento de la central sea más alto, sino para que la temperatura de la superficie del tubo sea lo más homogénea posible, lo que reducirá la probabilidad de que se produzcan roturas en los tubos del receptor de la central. Aunque esta temperatura no puede ser demasiado alta debido a las limitaciones del material del tubo y el fluido.

5 Presupuesto del proyecto

En este apartado se mostrarán los costes de la realización de este trabajo. Para ello se tendrán en cuenta los costes de material y de personal que suponen la realización del proyecto.

5.1 Costes de material

En primer lugar, se tomarán en cuenta los gastos de material. Para la realización de este trabajo se ha utilizado únicamente un ordenador y las licencias de los programas utilizados que han sido ANSYS v19.2, MATLAB R2018b y Microsoft Office 2010. En la Tabla 6 se presenta un resumen de los costes de material del proyecto. En el caso de las licencias de ANSYS y MATLAB, se han utilizado las versiones estudiantiles, por tanto, ya que su uso es libre para los estudiantes de la universidad, el coste que han tenido en este trabajo ha sido de 0€.

Los costes de material se calcularán a partir de la ecuación 4.1 que se muestra a continuación.

$$Coste = \frac{t_{uso}}{t_{depreciacion}} \cdot Uso \cdot Precio \quad (4.1)$$

Equipo	Precio (€)	Uso en el proyecto (%)	Dedicación (Meses)	Periodo de depreciación (Meses)	Coste (€)
Ordenador	1000	100	6	48	125
Licencia ANSYS	0	50	3	36	0
Licencia MATLAB	0	35	2	36	0
Licencia Office	40	15	1	36	0.16
Coste total de material					125,16

Tabla 6: Coste de material

5.2 Costes de personal

En cuanto a los costes de personal, se tendrá en cuenta el trabajo realizado por dos ingenieros, el autor del proyecto y el tutor del proyecto, estos costes se muestran en la Tabla 7.

Personal	Tiempo (Horas)	Coste (€/hora)	Coste total (€)
Autor del proyecto	400	12	4800
Tutor del proyecto	25	20	500
Coste total de personal			5300

Tabla 7: Coste de personal

5.3 Costes totales

Por último se mostrarán los costes totales que ha supuesto la realización del proyecto, que serán la suma de los costes de material y de personal más un 10% del coste total de gastos imprevistos (Ecuación 4.2). Estos se muestran en la Tabla 8, que se presenta a continuación.

$$\text{Coste imprevistos} = 0,1 \cdot \text{Coste total} \quad (4.2)$$

Tipo de coste	Coste (€)
Material	125,16
Personal	5300
Imprevistos	542,52
Total	5967,68

Tabla 8: Coste total

6 Planificación del proyecto

Para cumplir con el objetivo principal del proyecto se han realizado una serie de tareas que se describen a continuación:

- Recopilación de información sobre energía solar: En este paso se ha recopilado información sobre la situación actual de la energía solar, centrándose sobre todo en la energía solar térmica de tipo torre para aprender sobre los diferentes tipos de centrales, sus componentes y el funcionamiento de éstas.
- Recopilación de información sobre receptores de centrales de tipo torre: Como el objetivo principal de este proyecto consiste en determinar una geometría óptima para la separación de los tubos en el receptor, el componente más importante en este trabajo ha sido el receptor, por tanto se ha realizado una recopilación de información más profunda en lo que se refiere a la parte del receptor.
- Formación de uso de ANSYS Workbench: Este software es usado para crear la geometría y mallado de la zona que se quiere analizar, por tanto, ha sido necesaria una formación en el uso de este programa para poder realizar estas tareas.
- Formación de uso de ANSYS Fluent: Para realizar las diferentes simulaciones se ha utilizado este software, por lo que ha sido necesario aprender a usar este programa, ya que en este se meterán las diferentes condiciones que afectan a la geometría y nos dará las primeras soluciones.
- Realización de las simulaciones en ANSYS Workbench y Fluent: En este paso se han creado las diferentes geometrías y se han analizado imponiéndolas unas condiciones determinadas para así poder obtener una serie de resultados.
- Formación de uso de MATLAB: Para realizar el post-procesado es necesario el uso de este software, por tanto ha sido necesaria una formación para realizarlo.
- Realización del análisis de MATLAB: En este paso se han introducido los datos obtenidos de Fluent para poder realizar los diferentes análisis filtrando los datos que interesaban para la realización de este problema. Además se han realizado una serie de gráficas que muestran las diferentes soluciones de forma visual.
- Escritura de la memoria: Una vez realizado el análisis, el siguiente punto del trabajo ha consistido en la redacción de la memoria.
- Revisión de la memoria: Tras finalizar la escritura de la memoria, esta fue mostrada al tutor del proyecto, el cual aconsejó realizar algunas modificaciones en la memoria para que esta pudiese mejorar. Por tanto, la última tarea del proyecto fue realizar correcciones a la memoria.

6.1 Diagrama de Gantt del proyecto

La explicación de la planificación del proyecto se realizará mediante un diagrama de Gantt que se puede ver en la Tabla 9, un tipo de herramienta gráfica que expone el tiempo total empleado en la realización de las diferentes tareas del trabajo para su materialización.

	Enero 2019	Febrero 2019	Marzo 2019	Abril 2019	Mayo 2019	Junio 2019
Planificación del proyecto						
Recopilación de información sobre energía solar						
Recopilación de información sobre receptores de centrales tipo torre						
Formación uso de ANSYS Workbench						
Formación uso de ANSYS Fluent						
Realización de simulaciones en Ansys Workbench y Fluent						
Formación uso de MATLAB						
Realización de análisis de MATLAB						
Escritura de la memoria						
Revisión de la memoria						

Tabla 9: Diagrama de Gantt del proyecto

7 Conclusiones y trabajos futuros

En este capítulo se comentarán los resultados principales del proyecto y sus aplicaciones. Además de esto, se hablará de las futuras aplicaciones que podrá tener este trabajo además de las posibles líneas de estudio que puedan surgir a través de este trabajo.

7.1 Conclusiones

A partir de los resultados obtenidos en las simulaciones, se puede observar en primer lugar que, en lo que concierne a la geometría de la separación de tubos, la separación lateral entre estos tiene una importancia mayor que la distancia entre los tubos y la pared trasera del receptor, ya que como se ha observado en los análisis, esta distancia apenas tiene efecto en los parámetros que se estudian. Además, en cuanto a la distancia lateral entre tubos, se llega a la conclusión de que esta debe ser grande para que la diferencia de los valores de los parámetros a analizar (temperatura, radiación incidente y flujo de calor) sea lo más pequeña posible en la parte delantera y trasera del tubo.

En cuanto a lo que concierne al material, se puede ver en los resultados que la diferencia de temperaturas que se produce entre la cara delantera y trasera de los tubos del receptor se reduce ligeramente cuando se emplea como material para los tubos el Incoloy 800H, ya que debido a las características del material, la temperatura máxima que se alcanza es menor que la que se obtiene utilizando Inconel alloy 625. A esto se le suma que en la cara posterior del tubo, la temperatura que se obtiene es ligeramente mayor cuando se utiliza Incoloy 800H. Por tanto, se llega a la conclusión de que el Incoloy 800H sería un material más adecuado para emplear en los tubos del receptor, aunque el uso de este material está limitado por el precio, ya que tiene un coste alto, de unos 30-60\$/kg [37], haciendo que los costes de la central se disparen.

Por último, el otro parámetro que se varía en este análisis es la temperatura media del fluido de trabajo que circula por el interior del tubo. De este análisis se llega a la conclusión de que la temperatura que pasa por el interior del fluido debe ser lo más alta posible, no solo para que el rendimiento de la central aumente, sino para que la temperatura en el tubo sea lo más homogénea posible reduciendo así los problemas causados por la alta diferencia de temperaturas en la superficie del tubo, que ocasiona la rotura de estos.

7.2 Trabajos futuros

El campo de la energía solar térmica de tipo torre continúa en desarrollo en la actualidad, por tanto, aún queda mucho margen de mejora para este tipo de centrales.

Este trabajo consiste en la obtención de una geometría óptima para la separación de los tubos de una central solar de tipo torre mediante simulaciones en 2D. Este trabajo podría continuar mediante la realización de simulaciones en 3D, de esta manera se podría obtener un resultado más preciso y se podría ver qué sucede a lo largo de la longitud del tubo del receptor, ya que estos tienen una altura aproximada de 10 metros, pudiéndose realizar ensayos mecánicos en estos tubos completos.

Además de esto, el estudio de nuevos materiales para el tubo podría ser fundamental, ya que, como se ha comentado en el trabajo, los tubos del receptor están sometidos a grandes problemas de fatiga y de corrosión. El uso de un nuevo material se podría combinar con las conclusiones obtenidas en este trabajo para así reducir aún más las posibilidades de rotura de los tubos del receptor.

En cuanto al fluido de trabajo, actualmente se están realizando estudios para encontrar fluidos que no sean tan corrosivos, ya que este es uno de los principales problemas que afectan a los tubos de estas centrales. Además también se están realizando pruebas en las que se introducen ciclos súper críticos a este tipo de centrales. Esto hace que el rendimiento de las centrales aumente, por tanto, esto podría suponer una gran mejora en el futuro de la energía solar.

Todos estos proyectos están enfocados en mejorar el receptor, pero teniendo en cuenta que la central está compuesta por más componentes, estas mejoras tendrían influencia en otros parámetros, de esta manera, a partir del aumento de eficiencia que se produce en el receptor se podrían realizar modificaciones en otros componentes como el campo de heliostatos, ya que para una misma producción de energía, el campo de heliostatos se podría reducir. De esta manera, como el coste del campo de heliostatos es aproximadamente el 40% del coste [34], se podría reducir el tamaño del campo de heliostatos reduciendo el coste de construcción de la central.

8 Bibliografía

- [1] E. Comisión, «ec.europa.eu,» [En línea]. Available: <https://ec.europa.eu/energy/en/topics/energy-efficiency>.
- [2] REE, «Las energías renovables en el sistema eléctrico Español,» 2016.
- [3] «www.acciona.com,» [En línea]. Available: <https://www.acciona.com/es/energias-renovables/energia-solar/>.
- [4] P. R. Martínez, Energía solar térmica. Técnicas para su aprovechamiento, Marcombo, 2010.
- [5] A. R. L. Martínez, «www.centrales termosolares.com,» [En línea]. Available: <http://www.centrales termosolares.com/historia-de-la-energia-termosolar>.
- [6] M. P.-M. M. J. C.-S. J. A. C. Jiménez, «Energía solar térmica,» Madrid, 2008.
- [7] «gosmartbricks.com,» 2018. [En línea]. Available: <http://gosmartbricks.com/solar-water-heating-system/>.
- [8] D. V. SAC, «deltavolt.pe,» [En línea]. Available: <https://deltavolt.pe/energia-renovable/termica>.
- [9] «www.nasa.gov,» 7 Agosto 2017. [En línea]. Available: <https://www.nasa.gov/image-feature/solarreserve-inc-uses-aerojet-rocketdyne-technology-for-power-generation>.
- [10] «solar-energia.net,» 2015. [En línea]. Available: <https://solar-energia.net/energia-solar-termica/alta-temperatura>.
- [11] J. M. T. Murillo, «Modelo de parámetros distribuidos en ecosimpro de un captador solar tipo fresnel,» Sevilla.
- [12] P. S. d. Almería, «www.psa.es,» [En línea]. Available: <https://www.psa.es/es/instalaciones/fresnel/fresdemo.php>.
- [13] C. Mikroulis, «ANÁLISIS COMPARATIVO ENTRE EL EMPLEO DE ACEITE Y LA GENERACIÓN DIRECTA DE VAPOR, EN UNA PLANTA TERMOSOLAR DE CANALES PARABÓLICOS,» Sevilla, 2011.
- [14] «www.sociedadambiental.net,» [En línea]. Available: <http://www.sociedadambiental.net/m/blogpost?id=3224899%3ABlogPost%3A82954>.
- [15] R. M. B. Carnerero, «Estudio de la distribución de flujo y factor de desbordamiento de un sistema disco parabólico,» Sevilla, 2011.
- [16] «Energía solar,» Abril 2019. [En línea]. Available: <https://solar-energia.net/energia-solar-termica/alta-temperatura>.

- [17] D. I. Fernández, «ESTUDIO NUMÉRICO DEL FLUJO DE SALES FUNDIDAS EN UN RECEPTOR CENTRAL DE TORRE MEDIANTE FLUENT,» Madrid.
- [18] G. Orellana, «La primera central solar 24/7 del mundo ya se construye en Chile,» *Futuro Renovable*, 18 Julio 2014.
- [19] M. J. M. Pelayo, «DISEÑO Y OPTIMIZACIÓN DEL CAMPO SOLAR DE UN SISTEMA DE RECEPTOR CENTRAL CON SOBRECALENTAMIENTO DE VAPOR,» Sevilla.
- [20] «opex-energy.com,» OPEXenergy Operación y Mantenimiento S.L., [En línea]. Available: http://opex-energy.com/termosolares/funcionamiento_termosolar.html.
- [21] «gmdsol.com,» Agosto 2015. [En línea]. Available: <http://gmdsol.com/energia-termosolar-iii-torre-solar/>.
- [22] «torresolenergy.com,» [En línea]. Available: <http://torresolenergy.com/gemasolar/>.
- [23] P. Santana, «gobiernodecanarias.org,» 25 11 2017. [En línea]. Available: <http://www3.gobiernodecanarias.org/medusa/ecoblog/fsancac/2017/11/25/centrales-termosolares/>.
- [24] L. S. Gallar, «Modelización y simulación de la configuración de un campo solar para centrales termosolares de torre: influencia de la óptica del concentrador sobre la generación de energía,» Madrid, 2016.
- [25] M. d. I. R. R. Sánchez, «On the design of solar external receiver,» Madrid, 2015.
- [26] L. S. Gallar, «Modelización y simulación de la configuración de un campo solar para centrales termosolares de torre: influencia de la óptica del concentrador sobre la generación de energía,» Madrid, 2016.
- [27] «Acciona y Abengoa construirán la primera planta termosolar de Latinoamérica,» *ABC de Sevilla*, 11 julio 2018.
- [28] «www.grupocobra.com,» [En línea]. Available: <http://www.grupocobra.com/proyecto/central-termosolar-gemasolar-solar-3/>.
- [29] «www.abengoa.es,» Abengoa, 2019. [En línea]. Available: http://www.abengoa.es/web/es/noticias_y_publicaciones/galeria_videos/galeria_imagenes/energia/.
- [30] «www.solarreserve.com,» 2018. [En línea]. Available: <https://www.solarreserve.com/es/proyectos-globales/csp/planta-de-energia-solar-crescent-dunes.html>.
- [31] M. Á. M. Avilés, «“Estudio de la influencia del fluido caloportador en las propiedades térmicas e hidrodinámicas de un receptor tubobayoneta”,» Madrid, 2018.

- [32] «www.ptolomeo.unam.mx,» [En línea]. Available:
<http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/jspui/bitstream/132.248.52.100/277/6/A6.pdf>.
- [33] M. J. WAGNER, «Simulation and Predictive Performance Modeling of Utility-Scale Central Receiver System Power Plants,» Madison, 2008.
- [34] R. Z. Litwin, «Receiver System: Lessons Learned From Solar Two,» Canoga Park, CA, 2002.
- [35] S. G. R. B. Cs. Singer, «Assessment of improved molten salt solar tower plants,» Stuttgart, Germany , 2013.
- [36] S. M. Corporation, «INCONEL ALLOY 625,» 2013.
- [37] S. M. Corporation, «INCOLOY ALLOY 800,» 2004.
- [38] S. Kraemer, «csptoday.com,» [En línea]. Available:
<http://es.csptoday.com/tecnolog%C3%ADa/%C2%BFpuede-el-s-co2-aumentar-el-rendimiento-de-la-csp>.
- [39] I. ANSYS, «<https://ansyshelp.ansys.com>,» 2019. [En línea].
- [40] A. R. M. A. A. M. B. A. H. a. T. N. L. Clifford K. Ho, «CHARACTERIZATION OF PYROMARK 2500 FOR HIGH-TEMPERATURE SOLAR RECEIVERS,» Albuquerque, NM , 2012.
- [41] d. d. i. t. y. d. f. Universidad Carlos III de Madrid, «Listado de correlaciones Transferencia de calor,» Madrid, 2016-2017.
- [42] *. J. F. S. C.-L. R. Serrano-López, «Molten salts database for energy applications,» Burgos, 2013.
- [43] IRENA (International Renewable Energy Agency), «The power to change: Solar and wind cost reduction potential to 2025,» 2016.
- [44] «www.power-technology.com,» [En línea]. Available: <https://www.power-technology.com/projects/gemasolar-concentrated-solar-power/>.

Anexos

Código de Matlab utilizado

En primer lugar se muestra el código por el que se cargan los datos de las simulaciones sacados en Ansys Fluent en Matlab, este será conocido con el nombre de **Main**.

```
% Este script define en la variable ficheros los ficheros de simulacion
% y también llama a filtrar_datos para procesar los ficheros
% Los resultados es guardan en la variable rr
% Ex. r{1}          todo los datos filtrados del fichero 1
%      r{1}.file     el nombre del fichero original
%      r{1}.interior la matriz con todos los resultados del interior
%      r{1}.exterior[:,5] las temperaturas en la parte exterior

clear all;
close all;

global CARPETA_SIM;
% Carpeta donde están los ficheros de las simulaciones
global CARPETA_FIG;
% Carpeta destino para los plots que son guardados

CARPETA_SIM = 'simulaciones_buenas';
CARPETA_FIG = 'resultados';

% Dentro de las llaves se colocar entre paréntesis los nombres de los
archivos de datos de cada simulación que se quiere analizar

ficheros = {
    's1_2_s2_3_t700k_inconel_solarsalt',...
    's1_2_s2_5_t700k_inconel_solarsalt',...
    's1_2_s2_7_t700k_inconel_solarsalt',...
    's1_3_s2_3_t700k_inconel_solarsalt',...
    's1_3_s2_5_t700k_inconel_solarsalt',...
    's1_3_s2_7_t700k_inconel_solarsalt'
};

rr=cell(numel(ficheros),1);

for i=1:numel(ficheros)
    f = ficheros{i}; % nombre del fichero
    fprintf('Procesando %s...\n', f);
    rr{i} = filtrar_datos(f);
end
```

Nota: Los nombres de las simulaciones que se han incluido en el script varían en función de qué simulaciones se quieren analizar mediante MATLAB.

El script **Main** utiliza el script **filtrar_datos** para poder funcionar de forma correcta. Esto hace que se filtren los datos de las diferentes simulaciones para obtener únicamente los datos que nos interesan para realizar el análisis, en el caso de este problema, el tubo del receptor.

```
function result = filtrar_datos(fichero)
%Filtra los datos de la simulacion en fichero para obtener los datos
% result.file
% result.tubo
% result.exterior
% result.interior
%
% En todos los campos el resultado es una matriz de 7 columnas
% [ 1-theta 2-rho 3-x 4-y 5-temp, 6-incident radiation, 7-heat flux]

% Guardamos la variable del resultado en el nombre del fichero
% utilizado

result.file = fichero;

global CARPETA_SIM

Rext=0.0165;
Rint=0.015675;

% Se añade una tolerancia por si en el punto exacto del radio exterior
% no se encuentra ningún nodo en el mallado

Tol=(Rext-Rint)*1/100;

% Variables
% datos: los datos originales leídos desde el fichero
% ind: vector de valores lógicos con el resultado de un filtro dado
% valores: columnas (temp, rad_temp, ...) filtradas con ind

% Las columnas son [ 1-node, 2-x, 3-y, 4-temp, 5-incident radiation,
% 6-heatflux]

datos = csvread( [CARPETA_SIM filesep fichero], 2, 0);

% Convertir a coordenadas cilíndricas
[theta, rho]=cart2pol(datos(:,2),datos(:,3));

%%%% Filtrar punto del dominio

% Filtrar puntos del dominio para  $r \leq r_{ext}$  AND  $r \geq r_{int}$ 
ind = rho<=Rext & rho>=Rint;
valores = datos(ind,2:end);
result.tubo = [theta(ind), rho(ind), valores];

% Filtrar puntos del dominio para  $r \sim r_{ext}$ 
ind = rho<=Rext+Tol & rho>=Rext-Tol;
valores = datos(ind,2:end);
result.exterior = [theta(ind), rho(ind), valores];

% Filtrar puntos del dominio para  $r \sim r_{int}$ 
```



```
ind = rho<=Rint+Tol & rho>=Rint-Tol;
valores = datos(ind,2:end);
result.interior = [theta(ind), rho(ind), valores];

end
```

Tras el uso de estos dos scripts, ya se dispondrá de los datos que se hayan cargado de las diferentes simulaciones y se podrá trabajar con ellos.

A continuación, se mostrarán scripts para la obtención de gráficos que presenten el resultado de cómo afecta la separación de tubos a los diferentes parámetros.

En el caso del siguiente script, llamado **plot_vs_angulo**, se muestra, para una simulación en concreto, el gráfico de uno de los parámetros que se desean analizar para las superficies interna y externa del tubo.

```
function ax = plot_vs_angulo(ax, datos, tipo)
%plot_vs_angulo(ax, datos, tipo)
%
%Plot del parámetro indicado en tipo (temperatura, radiación incidente
%o flujo de calor) en función del ángulo.

%ax: se utiliza para crear el eje de las coordenadas
%Si ax=0 entonces la función crea un nuevo eje
%datos: carga la simulación previamente cargada en Matlab por el
%script Main que se desea
%tipo: Permite seleccionar el parámetro en Y ('t', 'ir', 'hf')
%Ejemplo de uso: plot_vs_angulo(0, rr{5}, 't')

% Determinamos el índice del parametro en Y de acuerdo con el string
tipo
[param_index, param_name, param_unit] = varInfo(tipo);

% Si ax==0 entonces creamos una figura y un eje
if ax==0
    figure;
    ax=axes;
end

% Obtenemos X e Y (angulo y tipo) para el interior
ang_int = datos.interior(:,1)*180/pi;
param_int = datos.interior(:,param_index);

% Obtenemos X y Y (angulo y tipo) para el exterior
ang_ext = datos.exterior(:,1)*180/pi;
param_ext = datos.exterior(:,param_index);

% Hacemos el plot
plot(ax, ang_int, param_int, '.b', ang_ext, param_ext, '.r');

% Colocamos las informaciones visuales
```

```

title(ax, [param_name ' vs. angulo' ] );
xlabel(ax, 'Ángulo (grados)');
ylabel(ax, [param_name ' (' param_unit ')'] );
legend(ax, 'Interior', 'Exterior');

end

```

Para utilizar el script **plot_vs_angulo** se utiliza previamente el script **varInfo**, por el que se muestran las diferentes variables de **filtrar_datos**. Su función es la de seleccionar los diferentes datos por separado e identificar a qué se refiere cada uno de los diferentes datos.

```

function [param_index, param_name, param_unit] = varInfo(var_name)
% Dado el código de una variable devuelve el indice, el nombre, y las
% unidades
% Ex. varInfo('t') --> [5, 'Temperatura', 'K']

switch var_name
    case 't'
        param_index = 5;
        param_name = 'Temperature';
        param_unit = 'K';
    case 'ir'
        param_index = 6;
        param_name = 'Incident radiation';
        param_unit = 'W/m^2';
    case 'hf'
        param_index = 7;
        param_name = 'Heat Flux';
        param_unit = 'W/m^2';

    otherwise
        error('El tipo indicado es inválido');
end

```

Para realizar un gráfico en el que se muestren los diferentes parámetros para una misma geometría se utilizará la función **plot_sim**.

```

function plot_sim(datos, carpeta)
% Crea una figura por cada simulacion en datos
% Cada figura contiene plots de los 3 parametros

% Da varias gráficas de los 3 parámetros diferentes (dentro de un
% mismo gráfico)

% Ex. plot_sim(rr, 'carpeta_destino')
% La carpeta de destino será 'resultados'

% Primero se crea una ventana vacia

fig=figure;

```

```
set(fig, 'WindowState', 'maximized');

% Se divide la ventana en tres plots diferentes

ax_t = subplot(1,3,1);
ax_ir = subplot(1,3,2);
ax_hf = subplot(1,3,3);

for i=1:numel(datos)
    r=datos{i};

    % Para crear los diferentes plots se utiliza la función plot_vs_angulo

    plot_vs_angulo(ax_t, r, 't');
    plot_vs_angulo(ax_ir, r, 'ir');
    plot_vs_angulo(ax_hf, r, 'hf');

    % Guardamos el plot en un fichero

    saveas(fig,[ carpeta filesep r.file], 'png');
end

end
```

Otro tipo de gráfico que se va a utilizar es el que se saca del script **plot_var**, por el que se obtienen diferentes gráficas de un mismo parámetro para simulaciones diferentes, por lo que su función principal es ver cómo varían los datos en función de la separación de los tubos.

```
function plot_var(datos, carpeta, tipo)

% Crea plots de un mismo parametro (ex. temperatura) para diferentes
% simulaciones

% Da varias gráficas del mismo parámetro (dentro de un mismo gráfico)

% datos: Cell array con los resultados de varias simulaciones
% tipo: String que determina la variable ('t', 'ir', 'hf')
% carpeta: Destino de los graficos que se crean en este script

% Ex. plot_var( rr( [1 2 3] ), 'carpeta_destino', 't')
% La carpeta de destino será 'resultados'

% Creamos una figura (ventana)

fig=figure;
set(fig, 'WindowState', 'maximized');

%%% Dividimos la ventana en tres ejes (plots)

% Iniciamos el vector ejes para contener la referencia al eje de cada
% simulacion

ejes = zeros(1, numel(datos) );

% Los dos primeros parametros definen 1 linea, 3 columnas (lo que da 3
```

```
% plots en total)
% El último parametro es para indicar el plot que estamos creando

for i=1:numel(datos)
    ejes(i) = subplot(1, numel(datos), i);
end

%%%% Hacemos los plot

for i=1:numel(datos)
    d = datos{i};
    plot_vs_angulo( ejes(i), d, tipo);
end

% Guardamos la figura en un fichero

saveas(fig,[ carpeta filesep d.file], 'png');
```

Para observar de manera general la diferencia de los parámetros a analizar en función de todas las geometrías se han filtrado cuatro puntos de la superficie del tubo y se han sacado sus valores en dichos puntos. Para ello se ha utilizado el código en Matlab que se presenta a continuación.

```
num_fich=numel(rr);

% Un fichero que sea filtrado con filtra_angulo da 1 linea y
% 7 columnas
% Las variables a seguir angulo_?? son matrices que tienen tantas
% líneas como ficheros

% Cada variable corresponde a los valores de las variables en el
% ángulo indicado. Ex angulo_90 son los valores a 90 grados
% La 7 columnas corresponden a los datos de la simulacion en la forma
% que son devueltos por filtrar_datos: theta, rho, ..., temp, ...
% En la función filtra_angulo tenemos que dar un tolerancia para
% garantizar que siempre tenemos puntos

angulo_90=zeros(num_fich, 7);

for f=1:num_fich
    angulo_90(f,:) = filtra_angulo( rr{f}.exterior, pi/2, 0.05);
end

angulo_menos90=zeros(num_fich, 7);

for f=1:num_fich
    angulo_menos90(f,:) = filtra_angulo( rr{f}.exterior, (-pi)/2,
    0.05);
end

angulo_0=zeros(num_fich, 7);

for f=1:num_fich
```

```
    angulo_0(f,:) = filtra_angulo( rr{f}.exterior, 0, 0.05);
end

angulo_180=zeros(num_fich, 7);

for f=1:num_fich
    angulo_180(f,:) = filtra_angulo( rr{f}.exterior, pi, 0.05);
end
```

Este script se nutre de la función **filtra_angulo** para poder funcionar.

```
function r = filtra_angulo(datos, angulo, tol)

% Primero buscamos que thetas estan en el angulo indicado +- tol

filtro = datos(:,1)<=angulo+tol & datos(:,1)>=angulo-tol;

% Ahora indexamos los datos en las lineas indicadas en el filtro
% Como teoricamente es posible tener varios puntos vamos a calcular la
% media

r = mean(datos(filtro, :));

end
```

Una vez se tienen filtrados los puntos de la superficie del tubo para estudiar sus parámetros, se utilizará la función llamada **plot_var_angulos** para mostrar estos datos en una misma gráfica. Para ello primero se selecciona un tipo, dependiendo del parámetro que se quiera analizar.

```
%El parámetro que se quiera poner en la grafica hay que dejarle de
%poner en comentario para que el programa funcione

tipo = 't';
%tipo = 'ir';
%tipo = 'hf';

[param_index, param_name, param_unit] = varInfo(tipo);

s1 = (2:8)';

figure;

% Angulo 0
ax_0 = subplot(2,2,1);
plot(ax_0, s1, angulo_0(1:3:21, param_index), '*--');
hold on
plot(ax_0, s1, angulo_0(2:3:21, param_index), '*--');
plot(ax_0, s1, angulo_0(3:3:21, param_index), '*--');

% Angulo 90
```

```
ax_90 = subplot(2,2,2);
plot(ax_90,angulo_90(1:3:21, param_index), '*--');
hold on
plot(ax_90,angulo_90(2:3:21, param_index), '*--');
plot(ax_90,angulo_90(3:3:21, param_index), '*--');

% Angulo 180
ax_180 = subplot(2,2,3);
plot(ax_180,angulo_180(1:3:21, param_index), '*--');
hold on
plot(ax_180,angulo_180(2:3:21, param_index), '*--');
plot(ax_180,angulo_180(3:3:21, param_index), '*--');

% Angulo 270
ax_menos90 = subplot(2,2,4);
plot(ax_menos90,angulo_menos90(1:3:21, param_index), '*--');
hold on
plot(ax_menos90,angulo_menos90(2:3:21, param_index), '*--');
plot(ax_menos90,angulo_menos90(3:3:21, param_index), '*--');

% Colocamos la informacion de los ejes
xlabel(ax_0, 'S1 (%)')
xlabel(ax_90, 'S1 (%)')
xlabel(ax_menos90, 'S1 (%)')
xlabel(ax_180, 'S1 (%)')

ylabel(ax_0, [ param_name ' (' param_unit ')]');

title(ax_0, [ param_name ' vs. S1 (\theta = 0)']);
title(ax_90, [ param_name ' vs. S1 (\theta = 90)']);
title(ax_menos90, [ param_name ' vs. S1 (\theta = -90)']);
title(ax_180, [ param_name ' vs. S1 (\theta = 180)']);
legend(ax_0, 's2=3%', 's2=5%', 's2=7%');
legend(ax_90, 's2=3%', 's2=5%', 's2=7%');
legend(ax_menos90, 's2=3%', 's2=5%', 's2=7%');
legend(ax_180, 's2=3%', 's2=5%', 's2=7%');
```